



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**PROBLEMATIKA VNITŘNÍHO PNUTÍ V MATERIÁLECH PŘI
OBRÁBĚNÍ TENKOSTĚNNÝCH DÍLŮ**

ISSUE OF INTERNAL TENSION IN MATERIALS DURING MACHINING OF THIN-WALLED COMPONENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Osička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Petr Osička**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Problematika vnitřního pnutí v materiálech při obrábění tenkostěnných dílů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V práci budou analyzovány příčiny vzniku vnitřního pnutí v materiálech po frézování, které budou spojeny s návrhem na jeho snížení zařazením vhodné strategie obrábění. Součástí práce bude měření vnitřního pnutí tří skupin hliníkových slitin včetně analýzy vybraných materiálů (s a bez tepelného zpracování). Práce bude obsahovat návrh vhodně aplikované strategie obrábění, která bude vycházet z dosažených výsledků. Práce bude ukončena diskusí s celkovým zhodnocením dosažených výsledků a problémů při měření.

Cíle diplomové práce:

1. Vnitřní pnutí v materiálech (popis, příčiny vzniku, následky).
2. Vliv řezných podmínek a strategie obrábění na vnitřní pnutí v materiálech.
3. Způsoby odstranění / eliminování vnitřního pnutí.
4. Měření vnitřního pnutí při frézování tenkostěnných dílů (porovnání hliníkových slitin skupiny 5000, 6000 a 7000 před a po tepelném zpracování).
5. Stanovení vlivu daných typů materiálu a použitých řezných podmínek na výsledné vnitřní pnutí.
6. Diskuse výsledků.

Seznam literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

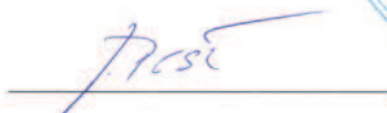
AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

AB SANDVIK COROMANT. Produktivní obrábění kovů. Sandvik Coromant, technické vyd. Švédsko: CMSE, 1997. 300 s. S-811 81 Sandviken, Švédsko.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.


Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu





doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzu příčin vzniku zbytkového napětí v materiálech při čelním frézování. Měřením jsou porovnáváni zástupci tří skupin hliníkových slitin (5000, 6000, 7000). K měření zbytkového napětí hliníkových slitin je využita vyvrtávací metoda za použití tenzometrických růžic. K stanovení vlivu průměru fréz je využita porovnávací metoda na výsledné rovinnosti obrobené plochy. Práce je ukončena diskuzí s celkovým zhodnocením dosažených výsledků.

Klíčová slova

Zbytkové napětí, čelní frézování, hliník, odvrtávací metoda, obrábění.

ABSTRACT

This master thesis focuses on analysing the origins of residual stress in material caused by face milling. Representatives of three groups of aluminum alloys (5000, 6000, 7000) are compared by measurements. For measuring of the residual stress in aluminum alloys, the hole-drilling method was used by applying tensometric rosettes. In order to determine the influence of the used milling cutters', flatness of the machined surface was analyzed by comparative method. The thesis concludes with a discussion and an overall evaluation of the results.

Key words

Residual stress, face milling, aluminum, hole-drilling method, machining.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OSIČKA, Petr. *Problematika vnitřního pnutí v materiálech při obrábění tenkostěnných dílů*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 52 s. 5 příloh. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Problematika vnitřního pnutí v materiálech při obrábění tenkostěnných dílů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Petr Osička

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D., za cenné připomínky, rady a vstřícnost při vypracování této diplomové práce.

Zvláštní poděkování bych chtěl věnovat zejména svým rodičům a celé rodině za jejich plnou podporu v době celého studia a během tvorby této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Valáškoví, bývalému manažerovi projektu ve Frentech Aerospace s.r.o., za nabídnutí řešení tohoto tématu a celému vedení firmy za podporu a umožnění vypracování diplomové práce.

V poslední řadě velmi děkuji Ing. Lubomíru Houfkovi, Ph.D. a Ing. Martinu Houfkovi, Ph.D, za poskytnutí a realizaci měření na odvrtávacím zařízení MTS 3000.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 Vnitřní pnutí v materiálech (popis, příčiny vzniku, následky)	10
1.1 Hliník a slitiny hliníku	10
1.1.1 Hliník technické čistoty	10
1.1.2 Slitiny hliníku	11
1.2 Vnitřní pnutí v materiálech	13
1.2.1 Dočasná vnitřní pnutí.....	13
1.2.2 Zbytková napětí	14
1.2.3 Pnutí I. druhu – makropnutí.....	15
1.2.4 Pnutí II. druhu – mikropnutí	15
1.2.5 Pnutí III. druhu – submikroskopická	15
2 Vliv řezných podmínek a strategie obrábění na vnitřní pnutí v materiálech	17
2.1 Jakost povrchu obrobených ploch.....	17
2.1.1 Integrita povrchu	18
2.1.2 Vznik zbytkových napětí	18
2.1.3 Ovlivněná vrstva	19
2.1.4 Zbytkové napětí po frézování	20
3 Způsoby odstranění / eliminování vnitřního pnutí.....	22
3.1 Žihání	22
3.1.1 Žihání ke snížení vnitřního napětí - Ocel.....	22
3.1.2 Žihání ke snížení vnitřního napětí - Hliník.....	22
3.2 Vibrování.....	23
3.3 Stárnutí	23
4 Měření vnitřního pnutí při frézování tenkostěnných dílů (porovnání hliníkových slitin skupiny 5000, 6000 a 7000 před a po tepelném zpracování).....	24
4.1 Měření dvouosé napjatosti tenzometrickými růžicemi ⁴	24
4.1.1 Metoda vrtání otvoru	24
4.1.2 Metoda uvolňování sloupku.....	25
4.2 Další metody měření zbytkového napětí.....	25
4.3 Samotné měření.....	26
4.3.1 Měřicí souprava	26

4.3.2	Parametry měření	27
4.3.3	Postup měření zbytkového napětí	28
5	Stanovení vlivu daných typů materiálu a použitých řezných podmínek na výsledné vnitřní pnutí.....	29
5.1	Vliv vlastností materiálu	29
5.1.1	Zbytkové napětí po hrubování	30
5.1.2	Zbytkové napětí po žíhání na odstranění zbytkového napětí.....	33
5.1.3	Zbytkové napětí po dokončování.....	35
5.2	Porovnání výrobních operací	38
5.2.1	Slitina 5083	38
5.2.2	Slitina 6082	39
5.2.3	Slitina 7075	40
5.2.4	Shrnutí porovnání výrobních operací	41
5.3	Vliv řezných podmínek	41
5.4	Výroba vzorků.....	43
6	DISKUZE	45
6.1	Návrhy pokračování řešení	48
	ZÁVĚR.....	49
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	51
	SEZNAM PŘÍLOH.....	52

ÚVOD

Slitiny hliníku patří kromě oceli k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Surovinou pro výrobu hliníku je minerál bauxit, v čistém stavu oxid hlinitý. Z taveniny tohoto oxidu ve směsi s kryolitem se elektrolyticky získává kovový hliník. Výroba hliníku byla patentována v roce 1886 a od roku 1890 zahájena v průmyslovém měřítku. V roce 1906 byla vyvinuta první slitina hliníku, známá jako dural (AlCu4Mg). Znamenala převrat ve stavbě vzducholodí a letadel. Dnešní základní řada nejvíce používaných slitin hliníku je celosvětově unifikována a její vývoj je v podstatě ukončen [1, 2].

Zbytková napětí se zjišťují především pomocí experimentálních metod, které umožňují jejich přímé nebo nepřímé měření. Základní rozdělení metod pro měření vnitřních napětí je na destruktivní a nedestruktivní. Princip destruktivního měření spočívá v uvolnění původních zbytkových napětí porušením materiálu a vyhodnocení odezvy, většinou deformací. Princip nedestruktivních technik je v nalezení vztahů mezi fyzikálními nebo krystalografickými vlastnostmi materiálu a zbytkovým napětím. Podle principu měření napětí, resp. deformací pak lze metody rozdělit na mechanické, difrakční a metody využívající fyzikálních vlastností materiálu [11].

Jedna z nejpoužívanějších metod pro měření zbytkových napětí, která byla použita k určení zbytkového napětí pro tuto práci, je odvrtávací metoda, která se někdy také nazývá jako metoda otvoru. První návrh na měření zbytkových napětí pomocí uvolnění odvrtáním otvoru a zaznamenání změny jeho poloměru podal v roce 1934 Josef Mathar. V roce 1966 byla Rendlerem a Vignisem rozvinuta systematická a opakovatelná procedura aplikace odvrtávací metody pro měření zbytkových napětí. V následujícím období došlo k rozvoji metody z hlediska technik odvrtávání otvoru, měření uvolněných deformací a vlastního vyhodnocení zbytkových napětí. Velmi významným mezníkem je přitom použití metody konečných prvků k výpočtu kalibračních koeficientů a k vyhodnocení zbytkových napětí z měřených uvolněných deformací (Schajer, 1981). To umožnilo především stanovení vnitřních napětí závislých na hloubce, ale přineslo také další možnosti použití metody, např. pro nehomogenní materiály, povlaky apod [11].

V současné době je odvrtávací metoda jednou z nejrozšířenějších metod měření zbytkových napětí. K vyhodnocení se využívají moderní výpočetní metody a probíhá vývoj metody především z hlediska technik odvrtání otvoru a možností měření deformací.

1 VNITŘNÍ PNUTÍ V MATERIÁLECH (POPIS, PŘÍČINY VZNIKU, NÁSLEDKY)

V následující kapitole budou přiblíženy základní fyzikální a chemické vlastnosti hliníku a jeho slitin. Bude také zaměřena na vznik a vlastnosti vnitřního napětí v materiálech.

1.1 Hliník a slitiny hliníku

Jako přednost slitin hliníku lze považovat zejména nízkou měrnou hmotnost a poměrně dobrou pevnost, což znamená, že měrné pevnostní charakteristiky (např. R_m/ρ) některých slitin hliníku jsou srovnatelné s obdobnými charakteristikami ocelí, případně jsou lepší. Slitiny hliníku, pokud neobsahují měď, velmi dobře odolávají korozi v atmosféře a látkám kyselé povahy. Odolnost slitin hliníku proti působení látek alkalických je naopak malá. Dobře se svařují v ochranné atmosféře, mají dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, jsou vyráběny v širokém sortimentu hutních produktů a vratný odpad se poměrně snadno zpracovává [1, 2].

Nedostatkem slitin hliníku je jejich nízká tvrdost a tedy snadné zhmoždění povrchu zpracovávaného materiálu a výrobků, obtížné třískové obrábění a mechanické leštění měkkých slitin (materiál se maže). Slitiny hliníku mohou být napadeny elektrochemickou korozí, jsou-li v konstrukci ve vodivém styku s ostatními kovy a slitinami s výjimkou zinku a kadmia [1, 2, 5].

1.1.1 Hliník technické čistoty

Asi 60 % hliníku technické čistoty se zpracovává na plechy. Ostatními hutními výrobky jsou tyče a dráty. Pevnost hliníku v tahu je nízká, ve stavu měkkém bývá R_m kolem 70 MPa, ve stavu tvrdém (po tváření za studena) R_m kolem 130 MPa (Další základní fyzikální vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tab. 1.1) [2].

Tab. 1.1 Vlastnosti hliníku [2].

Teplota tání	660 °C
Hustota	2,690 g.cm ⁻³
Modul pružnosti v tahu	71 GPa
Mez pevnosti v tahu	70 MPa (vyžíhaný stav)
Mez kluzu	20 MPa (vyžíhaný stav)
Tažnost	20 až 30 %
Tvrdost	20 HB (vyžíhaný stav)

Hliník je používán zejména jako elektrovodný materiál (Al 99,5 ČSN 42 4004, viz tab. 1.2) a materiál pro elektrické kondenzátory. V chemickém a potravinářském průmyslu se uplatňuje pro dobrou tepelnou vodivost a odolnost proti korozi v kyselém prostředí. Používá se pro obaly, plátování plechů ze slitin hliníku obsahujících měď, plátování plechů ocelových nebo jako alitovaná povrchová vrstva na výrobcích z oceli a slitin niklu proti korozi a okoujení [1, 2].

Tab. 1.2 Technicky čistý hliník – řada 1000 [2].

ČSN		EN	
Označení	Číslo	Označení	Číslo
Al 99,8	42 4002	Al 99,8	AW-1080A
Al 99,7	42 4003	Al 99,7	AW-1070A
Al 99,5	42 4004	Al 99,5	AW-1050A
Al 99	42 4009	Al 99	AW-1200

1.1.2 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku lze dělit podle různých kritérií. Nejčastější je dělení podle způsobu zpracování, respektované ČSN. Ke dni 1. 1. 1995 bylo v ČSN registrováno 18 slitin hliníku pro tváření a 16 slitin hliníku pro odlitky [1].

Jiným kritériem pro dělení slitin může být jejich schopnost zvýšit tvrdost a pevnost tepelným zpracováním. Tato schopnost souvisí s chemickým složením slitin, tedy jejich polohou v rovnovážném diagramu odpovídající soustavy a mimo jiné je podmíněna dostatečným přesycením tuhého roztoku na bázi hliníku přísadovými prvky při rychlém ochlazení slitin z oblasti existence tuhého roztoku α [2].

Značení hliníku a jeho slitin

Značení hliníku a jeho slitin pro tváření je u nás převážně řešeno dle ČSN EN 573-1,2 a 3. Značení začíná písmeny EN (evropská norma) a AW (A ~ hliník / W ~ tvářené slitiny) a následují čísla, která určují chemické složení slitiny. Např. EN AW 1050 znamená chemicky Al 99,5%, tedy téměř čistý hliník. Slitiny hliníku dělíme na těchto osm základních skupin [1, 2]:

- skupina 1000 – v podstatě čistý hliník s minimálním obsahem 99% hliníku,
- skupina 2000 – slitina hliníku s mědí,
- skupina 3000 – slitina hliníku s manganem,
- skupina 4000 – slitina hliníku s křemíkem,
- skupina 5000 – slitina hliníku s hořčíkem,
- skupina 6000 – slitina hliníku s hořčíkem a křemíkem,
- skupina 7000 – slitina hliníku se zinkem,
- skupina 8000 – slitina hliníku s různými prvky, převážně s lithiem.

Tab. 1.3 Příklady často používaných slitin v průmyslu [1, 2].

ČSN		EN		Rm
Označení	Číslo	Označení	Číslo	[MPa]
AlMg2	42 4412	AlMg2	AW-5051	140 – 255
AlMg3	42 4413	AlMg3	AW-5754	170 – 280
AlMg5	42 4415	AlMg5	AW-5019	200 – 420
AlMgSi1Mn	42 4400	AlSi1MgMn(A)	AW-6082A	270 – 330
AlMgSi	42 4401	AlMgSi	AW-6060	130 – 280
AlZn6Mg2Cu	42 4222	AlZn5.5MgCu	AW-7075	200 – 580

Slitiny nízkopevnostní

V této podskupině jsou zařazeny slitiny soustav Al-Mg a Al-Mn. Neobsahují měď, proto mají dobrou odolnost proti korozi i bez povrchové ochrany, na druhou stranu je ale nelze tepelným zpracováním podstatně zpevnit (vytvrdit) [1, 2].

Slitiny Al-Mg

Tvoří řadu AlMg2, AlMg3, AlMg5 a AlMg6. Slitiny s obsahem hořčíku větším než 6 hm. % mají sklon ke korozi po hranicích zrn, zejména při mechanickém zatížení, proto se obvykle nepoužívají [1].

Nízkou pevnost slitin Al-Mg (v žíhaném stavu $R_m = 140$ až 200 MPa) lze zvýšit deformačním zpevněním, tedy tvářením za studena (max. do $R_m = 420$ MPa), které se používá především pro slitinu AlMg5, a to se stupněm deformace 20 až 30 %. Při větších deformacích značně klesá tvárnost slitin i jejich odolnost proti korozi [1, 2, 5].

- **EN AW 5005 (AlMg1)** používána ve výrobě spotřebičů, malých lodí, plynového potrubí, panelů lednic a kuchyňských potřeb. Slitina je také používána ve stavebních dílech a jako elektrické vodiče.
- **EN AW 5049 (AlMg2Mn0,8)** používána na kontejnery k silniční dopravě, cisterny, statické kontejnery provozované do 100 °C. Má nižší pevnost než slitiny s vyšším obsahem Mg, dobrou odolnost proti korozi. Může být používána při teplotách do 100 °C bez obav z mezikrystalové koroze vlivem napětí.
- **EN AW 5052 (AlMg2,5)** používána hlavně při výrobě hydraulických trubek, kuchyňských skříněk, malých lodí, domácích mrazáků, krabic na mléko, trubek v letadlech, oplocení a spotřebičů. Používáno k výrobě běžných součástek z plechů.
- **EN AW 5083 (AlMg4,5Mn)** používána ve výrobě svařovaných tlakových nádob, vrtných souprav, TV věží, dopravních zařízeních, v lodním průmyslu a v raketových součástkách.
- **EN AW 5754 (AlMg3)** svařované konstrukce v jaderném, chemickém a potravinářském průmyslu. Tlakové nádoby, trubky (pro hydraulické použití), kotle. Vhodné použití také na stavbu lodí a vzhledem k dobré eloxovatelnosti na architektonické prvky. Použití na karoserie vozidel, silniční stožáry a konstrukce. Běžná slitina plechů střední pevnosti. Velmi dobrá svařitelnost. Velmi dobrá odolnost proti korozi, zvláště v mořské vodě a námořním a průmyslovém ovzduší. Dobrá tvarovatelnost za studena. Střední pevnost, mírně vyšší než 5052 a 5251. Vysoká pevnost únavy. Dobrá obrobitelnost. Méně vhodné k extruzi než Al-Mg-Si slitiny.

Slitiny Al-Mg-Si

Na rozdíl od slitin Al-Mg lze slitiny Al-Mg-Si vytvrdit tepelným zpracováním (R_m až 350 MPa). Jsou dobře tvárné a svařitelné. Používají se zejména v letectví, jak ukazují jejich obchodní názvy (např. Avial), ve stavebnictví a v bytové architektuře [1, 2, 5].

- **EN AW 6061 (AlMg1SiCu)** použití k výrobě vysoce namáhaných konstrukcí vyžadujících dobrou odolnost proti korozi, součástek pro nákladní automobily a námořnictví, vlaků, nábytku, kování nádrží, obecně součástí konstrukčních a vysokotlakých použití, drátěných výrobků a k výrobě potrubí.
- **EN AW 6063 (AlMgSi)** pohledové části oken, dveří, fasád, interiérové vybavení, rámové systémy, osvětlení, žebříky, zábradlí atd. Části chladičů, elektronické moduly, kryty elektromotorů. Flexibilní montážní systémy, speciální strojní prvky. Podlahy kamionů a přívěsů, pneumatické instalace, železnice, vnitřní použití, zavodňovací trubky. Nábytek, kancelářské vybavení. Použití pro radiátory a ostatní výměníky tepla. Velmi dobrá odolnost proti korozi. Velmi dobrá svařitelnost. Střední mez únavy. Dobrá tvařitelnost zejména ve stavu T4. Vhodná k všeobecnému použití. Standardní dekorativní a eloxovatelná kvalita.
- **EN AW 6082 (AlMgSi1)** používána na hliníkový plech, profil, kulatina používána všeobecně pro obrábění. Konstrukce s vyšší pevností zejména v železničních

vozech, rámech kamionů, stavba lodí, námořní průmysl, mosty, vojenské mosty, kola, kotle. Stroje: plošiny, příruby, hydraulické systémy, důlní stroje, stožáry a věže, motorové čluny. Jaderná technika. Stožáry a nosníky na stavbu lodí (zejména pro sladkovodní). Trubky na lešení, rámy pro stany a haly, potrubí, závity, nýty. Velmi dobrá odolnost proti korozi. Velmi dobrá svařitelnost (nižší hodnoty pnutí v oblasti sváru). Dobrá tvařitelnost zejména ve stavu T4. Slitina s vyšší pevností než u 6061. Středně vysoká mez únavy.

Slitiny s vyšší a vysokou pevností

Patří zde slitiny soustav Al-Cu-Mg (duraly), Al-Cu-Mg-Ni, Al-Cu-Si-Ni, Al-Cu-Si-Mn, Al-Zn-Mg-Cu. Zaměříme se však pouze na slitiny skupiny 7000 – slitiny Al-Zn-Mg-Cu [1].

Slitiny Al-Zn-Mg-Cu

Jsou nejpevnějšími slitinami hliníku. V ČR je normována pouze jedna slitina, a to AlZn6Mg2Cu. Po tepelném zpracování dosahuje pevnosti $R_m = 500$ až 580 MPa.

K hlavním nedostatkům těchto slitin patří sklon ke korozi pod napětím, nižší lomová houževnatost a vyšší vrubová citlivost než u duralů. Výsledné mechanické vlastnosti, korozní i únavová a lomová odolnost jsou závislé na použitém způsobu tepelného zpracování [1, 2, 5].

- **EN AW 7020 (AlZn4,5Mg1)** svařované strojírenské konstrukční součásti, vojenské použití, mosty, karosérie vlaků, montážní díly podlah, přístupové rampy, konstrukční části kamionů, kontejnery, stavebnictví, stožáry. Tepelně upravitelná vysokopevnostní svařitelná slitina. Vysoká mez únavy. Vysoká pevnost ve svařovaných konstrukcích.
- **EN AW 7075 (AlZn4,5MgCu1,5)** je používána zejména tam, kde je důležitá kombinace vysoké tvrdosti a nízké hmotnosti. Je použitelná např. v automobilovém průmyslu (například nárazníky), výrobě strojů a podobně.

1.2 Vnitřní pnutí v materiálech

V celé technologické praxi narážíme na řadu případů, kdy ve výrobku vznikají vnitřní napětí-pnutí, někdy tak značná, že může dojít ke vzniku mikrotrhlin, je-li úroveň pnutí srovnatelná s pevností, i k porušení celého výrobku. Napětí také může způsobit pouze deformaci obrobku ať už opravitelnou, nebo neopravitelnou. Vedle tepelného a chemicko-tepelného zpracování jde i o důsledky intenzivního tváření za studena, hrubovacích, ale i dokončovacích metod obrábění, svařování, pájení, odlévání, povlakování kovy, plasty a především keramikou [3, 5, 7].

Z hlediska časového působení vnitřních pnutí jsou známa:

- **dočasná vnitřní pnutí,**
- **zbytková vnitřní pnutí.**

1.2.1 Dočasná vnitřní pnutí

Dočasná vnitřní pnutí působí, pokud trvá příčina, která je vyvolala. Touto příčinou nejčastěji bývá nerovnoměrné teplotní pole mezi povrchovými a vnitřními partiemi výrobku. Poté pružná deformace vzniklá lokální rozdílnou dilatací vytváří dočasné vnitřní napětí, které trvá, dokud se nevyrovnají teploty v celém objemu výrobku. Stejně dočasný

charakter může mít i vnitřní pnutí vznikající během ohřevu nebo ochlazování kovu, ve kterém dochází k nehomogenní deformaci z důvodu nerovnoměrného průběhu fázové transformace [3, 5].

1.2.2 Zbytková napětí

Jestliže i po přerušení vnějšího zatížení (externí silové působení či nemechanická příčina) zůstane část vnitřního napětí ve výrobku, jedná se o zbytková napětí. Zbytkové napětí je tedy jedním z mnoha druhů vnitřního napětí vznikajících v důsledku nehomogenní deformace a můžeme je obecně definovat jako víceosé napětí, působící ve výrobku po velmi dlouhou dobu přesto, že všechny jeho části mají stejnou teplotu a na výrobek již nepůsobí žádné vnější síly [3, 5].

Zbytková napětí jsou napětí, která se vyskytují v materiálu bez působení vnějších sil (vnitřní pnutí). Zbytkové napětí je vlastností celkového stavu materiálu. Vzniká v důsledku technologických procesů výroby materiálu a má vliv na jeho pevnostní, únavové nebo korozní charakteristiky. Je předpokládáno, že tlaková zbytková napětí jsou výhodná (nejsou nevýhodná) a tahová zbytková napětí jsou nevýhodná - např. podporují vznik a rozvoj trhlin. Vysokým vnitřním napětím však může vést ke vzniku nežádoucím deformacím vlivem jejich uvolňování a degradací mechanických vlastností jak v případě tahových, tak i tlakových napětí [3, 5].

Vznik zbytkových napětí je způsoben výskytem plastické deformace: Zbytková napětí jsou rovna rozdílu mezi skutečnými napětími v pružně plastickém tělese a fiktivními napětími, která by v něm vznikla za předpokladu ideálně pružného materiálu. Zbytkové napětí ale nutně nemusí být spojeno s plastickou deformací. Příčiny vzniku vnitřních napětí lze rozdělit do několika skupin [3, 5, 6]:

- **Mechanické přetvoření:** Nehomogenní plastická deformace při mechanickém zpracování materiálu. Např. obráběním jsou povrchové vrstvy deformovány intenzivněji, než vnitřní část obrobku. Po odstranění vnějších tlakových sil vzniká na povrchu tahové a uvnitř tlakové pnutí.
- **Tepelná zbytková pnutí** vyvolaná různými teplotními gradienty uvnitř obrobku či rozdílnými teplotními koeficienty roztažnosti jednotlivých částí výrobku nebo strukturálních složek (deformace v důsledku nehomogenního teplotního pole.)
- **Chemická a strukturální zbytková pnutí:** V důsledku chemických reakcí, fázových přeměn a rozdílných fyzikálních vlastností jednotlivých fází. Nehomogenní strukturální transformace je doprovázena objemovými změnami (např. transformace austenitu na ferit nebo objemově rozdílnější transformace austenitu na martenzit).
- **Vícevrstvé struktury:** Rozdílnosti jednotlivých vrstev materiálu způsobují vznik napětí.
- **Nové technologie:** Nerovnovážné nebo neoptimalizované podmínky procesů ve speciálních technologiích vytváření a modifikace materiálů.
- **Konstrukční celky:** Nepřesnosti jednotlivých součástí spojených v konstrukčních celcích.

Ve většině případů působí více vlivů, které ovlivňují výsledná zbytková napětí v materiálu, jedná se tedy o tzv. sdružený proces. Za určitých okolností se vnitřní napětí mohou také

uvolňovat nebo přerozdělovat. K takovým procesům může docházet např. při mechanickém namáhání, snížení meze kluzu, případně strukturními změnami při ohřevu, výskytem mikrotrhlin, vlivem stárnutí nebo vlivem tečení materiálu (creep). Přerozdělení zbytkových napětí může vyvolat i vnější zatížení materiálu, především v případech, kdy se jedná o zatížení cyklické [3, 5].

Společnou podstatou všech pnutí je zřejmé z Hookova zákona [3]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (1.1)$$

Úroveň pnutí je určována velikostí elastické deformace vyvolané objemovými změnami ve výrobku. Pojem vnitřního pnutí tedy plně odpovídá pojmu vnitřní elastické deformace, neboť ta tento jev zcela kontroluje. Dále je pak pnutí funkcí modulu pružnosti E [3].

Pokud je materiál vystaven náhlé změně teploty, dochází v něm ke vzniku teplotních gradientů. Vlivem tepelné roztažnosti pak vznikají v materiálu vnitřní pnutí, která mohou vést k plastické deformaci takového materiálu nebo dokonce k jeho lomu. Plasticky se při rychlém ochlazení deformují tvárné materiály, zejména slitiny kovů (např. ocelové součástky při kalení). K lomu může docházet u křehkých materiálů (skla, keramika atd.). Odolnost proti náhlým teplotním změnám je ovlivněna mírou tepelné roztažnosti materiálu (velikostí koeficientu teplotní roztažnosti). Čím je tepelná roztažnost nižší, tím nižší pnutí se v materiálu tvoří a tím více je tedy materiál odolný vůči náhlým tepelným změnám. Příkladem materiálu vysoce odolného je křemenné sklo, které má velmi nízký koeficient roztažnosti [3].

Vnitřní pnutí se obvykle rozdělují podle velikosti objemů, v nichž působí:

1.2.3 Pnutí I. druhu – makropnutí

Zasahují celý objem výrobku a jejich orientace je určena především jeho geometrií. Vznikají jako důsledek výrobních operací např. hrubování nevyžíhaného odlitku odstranění povrchovou vrstvou, stav napjatosti se změní a výrobek se deformuje. Vznikají v každém ohřívaném nebo ochlazovaném výrobku (bez ohledu na průběh fázových přeměn) v důsledku nerovnoměrnosti jak vnějšího, tak vnitřního přenosu tepla. U plastických ocelí se toto makropnutí snižuje postupnou plastickou deformací. Tento proces se označuje relaxace [3, 5].

1.2.4 Pnutí II. druhu – mikropnutí

Působí v oblastech srovnatelných s velikostí zrna nebo několika subzrn. Vznikají fázovou deformací nebo deformací kovu, když různá zrna či subzrna vykazují rozdílné elastické napětíové stavy. Orientace těchto pnutí se neváže ke geometrii výrobku. V celém objemu se pnutí II. druhu mohou vzájemně vyrovnat. Někdy se označují jako homogenní mikroskopická pnutí [3, 5].

1.2.5 Pnutí III. druhu – submikroskopická

Také tato pnutí nemají žádný vztah k tvaru výrobku. Zasahují nepatrné objemy řádově velikosti elementární buňky krystalové mřížky. Tato nehomogenní pnutí jsou důsledkem elastické distorze mřížky při rozměrech od zlomku nanometru do hodnoty mřížkového parametru. Charakteristickými příklady jsou bodové mřížkové poruchy (vakance, intersticiální či substituční atomy). Také napjatost vyvolaná hranovou dislokací či koherentním rozhraním matrice a vyloučeného precipitátu způsobuje submikroskopická pnutí [3, 5].

U reálných výrobků se nesetkáváme s výše uvedenými druhy pnutí jednotlivě. Obecně vzniklá vnitřní napjatost je výsledkem superpozice pnutí II. až III. druhu. Pnutí jednotlivých druhů se vzájemně ovlivňují, např. nárůst mikropnutí může vést až ke vzniku makropnutí [3, 5].

2 VLV ŘEZNÝCH PODMÍNEK A STRATEGIE OBRÁBĚNÍ NA VNITŘNÍ PNUTÍ V MATERIÁLECH

Současné trendy v rozvoji výrobních systémů se dají charakterizovat snahou o zvyšování pružnosti výrobních procesů, která lze uplatnit ve všech typech výroby. Tento trend se dá vyzorovat nejen u jednodušších obráběcích strojů, ale i u složitých obráběcích center. Realizace těchto cílů je ve využívání moderních řídicích prvků, kterými lze řídit nejen vzájemně polohy, dráhy, rychlosti pohybu nástroje a obrobku, ale i automatickou výměnu nástrojů, manipulaci s obrobky i jejich kontrolu po skončení daných operací [3, 6, 7].

Jednou z cest, jak dosáhnout zvýšení produktivity práce v moderní výrobě, je zabezpečit intenzifikaci řezného procesu. Přitom je nutné brát v úvahu i hlediska jejího vzniku na jakost obrobeného povrchu. Předpokládá-li se, že při volbě řezných podmínek nejsou omezujícími faktory možnosti stroje, potom zbývajícími činiteli jsou nástroj (jeho tuhost, řezivost) a chování materiálu při řezání [3, 6, 7].

V současné době je zaznamenáván velký pokrok v oblasti konstrukce a materiálu nástroje. Jedná se o široké uplatnění vyměnitelných břitových destiček a břitových bloků. Jsou nabízeny všechny hlavní druhy – od rychlořezných ocelí a slinutých karbidů, přes řeznou keramiku až po syntetický diamant a kubický nitrid bóru. Roste i podíl těžkoobrobitelných materiálů [3, 6, 7].

2.1 Jakost povrchu obrobených ploch

Vývoj v oblasti výrobní techniky, řezných materiálů je většinou hodnocen z hlediska vlivu na produktivitu práce. Vezme-li se ale v úvahu plné využití řezivosti nových nástrojových materiálů a příkon strojů, které jsou několikanásobné ve srovnání s klasickými, vzniká zde otázka, zda toto množství energie převedené na břit nástroje neovlivní výrazněji vlastnosti obrobeného povrchu, především jeho jakost [3, 5, 6].

Jakost obrobeného povrchu je možné posuzovat podle následujících hledisek:

- přesnosti rozměru a tvaru,
- drsnosti a mikrostruktury,
- vlastnosti povrchové vrstvy.

Přesnost rozměru a tvaru je dána vlastní přesností stroje, tuhostí systému Stroj-Nástroj-Obrobek a dalšími faktory, které ale působí nepřímo na technologický proces.

Drsnost a mikrostruktura povrchu je ovlivněna bezprostředně procesem řezání. Nejvýznamnějšími prvky tohoto vlivu jsou řezná rychlost, tvar nástroje, působení různých řezných materiálů, jejich opotřebení apod [3, 7].

Vlastnosti povrchové vrstvy jsou vyjadřovány strukturními změnami, které jsou úměrné velikosti zbytkových napětí. Vzhledem k tomu, že intenzita procesu řezání se stále zvyšuje v důsledku dalšího růstu vyšších řezných rychlostí a vyššího energetického působení na břit nástroje, je nutno počítat s tím, že vlastnosti povrchové vrstvy součásti se mohou výrazně měnit vzhledem k vlastnostem materiálu ve větší vzdálenosti od povrchu [3, 7].

Z teoretického rozboru procesu řezání a na základě experimentálního výzkumu lze konstatovat, že řezné podmínky mají významný vliv na vlastnosti povrchové vrstvy. Ať už je to řezná rychlost, druh nástrojového materiálu, nebo změna dokončovací operace ve

všech těchto případech je možné považovat účinek různých technologií a řezných podmínek na vlastnosti povrchové vrstvy za prokázaný [3, 6].

Je i statisticky doloženo, že většina poruch strojních součástí za provozu vzniká na povrchu, nebo těsně pod ním. To ukazuje, že mezní stav v takových případech závisí na úzce lokálních vlastnostech materiálu v nejnamáhanějším místě a ne na průměrných vlastnostech celého průřezu. Z hlediska únavové pevnosti to znamená, že v důsledku použité technologické operace je změněná povrchová vrstva vystavena maximálním napětím od vnějších sil. Vedle toho působí na možné poruchy na povrchu i stopy po obrábění, které fungují jako vruby [3, 6].

V konstrukci moderních strojů a zařízení, v energetice, v letecké a dopravní technice, kde se stále více uplatňují materiály s vyššími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, se dá očekávat, že vliv technologie výroby a její účinek na vlastnosti povrchové vrstvy se bude projevovat stále výrazněji. Je to způsobeno vyšší hodnotou deformační práce a teplotou v místě tvoření třísky, často horší tepelnou vodivostí použitých materiálů a také vyššími mechanickými vlastnostmi [3].

2.1.1 Integrita povrchu

Z hlediska výroby má zásadní význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součástí, protože umožňuje pochopit povahu a vlastnosti takto vytvořeného povrchu, dává možnost pro zlepšení použitých procesů a případně umožňuje vytvoření obrobených ploch bez poruch [3, 7].

Všechny změny, které nastávají v povrchové vrstvě součástí, lze shodně posuzovat jako změny jakosti. Tyto změny se potom mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity [3, 7].

Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek [3, 7].

Problém i obsah integrity funkčních ploch součástí byl definován již začátkem sedmdesátých let, kdy bylo ukázáno, že je nutné dávat do souvislosti podmínky technologických operací s požadavky jakosti, spolehlivosti a životnosti součástí i zařízení. První práce na tomto úseku byly zaměřeny na opracování vysoce pevných ocelí [3, 6, 7].

Zatím neexistuje způsob, kterým lze komplexním způsobem zhodnotit nově vytvořenou plochu z hlediska její integrity. Řada údajů o obrobené ploše se sice běžně zjišťuje, pro jiné jsou zpracovány postupy a navrhována potřebná zařízení. Zatím nejspolehlivější zkouškou integrity je vlastní provoz [3, 6, 7].

2.1.2 Vznik zbytkových napětí

Při posuzování vlivu technologických procesů na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku při jeho výrobě je možné vycházet z druhu a intenzity energií, které se na jeho realizaci podílejí. Jedná se o energii mechanickou, tepelnou a chemickou. Je nutné ale brát v úvahu i vlivy metalurgické, fyzikální a také vlastností materiálu [3, 6, 7].

Hlavní příčinou vzniku zbytkových napětí jsou:

- nerovnoměrná plastická deformace v obrobeném povrchu,
- nerovnoměrný ohřev a ochlazování materiálu, které vyvolává jeho roztažení a smršťování,
- nerovnoměrné změny struktury vyvolané působením tepla a mechanických sil,
- chemické procesy spojené s reakcí částic pronikajících do povrchové vrstvy.

Každá technologická operace dosahuje přestavby zbytkových napětí svým vlastním způsobem jen v takovém objemu materiálu, v jakém je schopna vyvolat plastickou deformaci a tepelně jej ovlivnit [3].

Při obrábění je podstatou vzniku zbytkových napětí pružně-plastická deformace v oblasti tvoření třísky. Důležitým faktorem je doba působení vlivů podmínek řezání a rychlost změn probíhajících stavů. To se výrazně projevuje např. při broušení, kdy ohřev je velmi rychlý a krátkodobý, rychlost ohřevu i doba chladnutí probíhají za extrémních podmínek [3].

Z těchto důvodů se ukazuje nutnost sledovat a hodnotit zbytková napětí v povrchové vrstvě např. kalených ocelí, které budou použity třeba pro výrobu valivých ložisek [6, 7].

I když na jakost povrchové vrstvy má největší vliv poslední operace, může při nevhodně zvoleném sledu operací zůstat v povrchové vrstvě ovlivnění z předchozích operací.

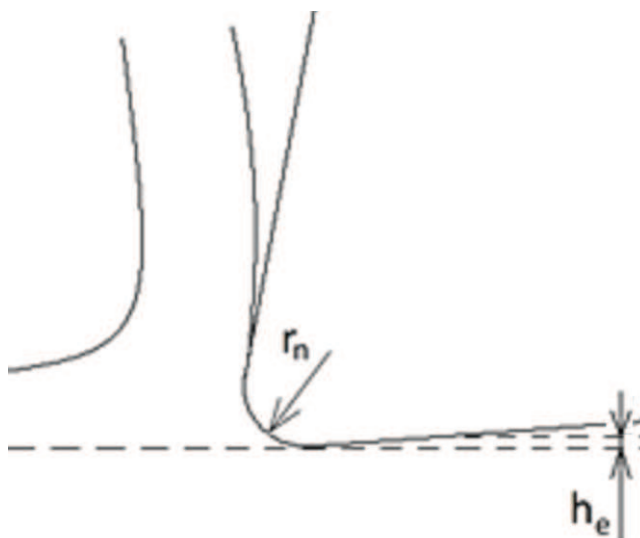
Z hlediska běžných kontrolních metod se může povrchová vrstva jevit jako stejná, měří-li se tvrdost, drsnost a tvarová úchylka. Přitom mohou v povrchové vrstvě být různá zbytková napětí a to napětí různá co do smyslu i velikosti [3, 6, 7].

Byla publikována řada hypotéz o účinku zbytkových napětí na únavovou pevnost. Jejich závěry, zkušenosti z praxe a výsledky experimentů výzkumu se shodují s tím, že tahová zbytková napětí únavovou pevnost snižují, tlaková zbytková napětí je naopak zvyšují. Jejich účinek však není rovnocenný a vyžaduje ověření [3, 6, 7].

Obecně lze očekávat, že během provozu součásti, zejména při vyšších teplotách, může dojít k relaxaci zbytkových napětí [3].

2.1.3 Ovlivněná vrstva

Při obrábění vzniká napěťové pole, které vyvolává určitý stav deformace. Tyto deformace jsou ovlivňovány i teplotním polem, které mění vlastnosti materiálu. Jak je na obr. 2.1 zřejmé, bude mít poloměr zaoblení nástroje ρ značný vliv na velikost deformace povrchové vrstvy, u které dojde v důsledku plastické deformace ke zpevnění, což se výrazně projeví hlavně u tvárných materiálů. Hloubka a intenzita zpevnění bude také závislá ještě na rezné rychlosti, tloušťce a šířce odřezávané vrstvy, a také na geometrii nástroje [3, 6, 8].



Obr. 2.1 Schematické znázornění ovlivněné oblasti při odebírání třísky řezným nástrojem [3].

Takto zpevněná povrchová vrstva h_e na obr. 2.1 má příznivý vliv na mechanické opotřebení obrobenej plochy a zvyšuje její odolnost proti korozi [3].

Vlastnosti povrchové vrstvy ovlivňují také zbytková pnutí jako důsledek poruch struktury vyvolaných elasticko-plastickou deformací, a také objemových změn strukturálních složek, což je výsledek fázových změn. Zbytková napětí po obrábění je možno rozdělit do dvou skupin. Vlastnosti povrchové vrstvy ovlivňují také zbytková pnutí jako důsledek poruch struktury vyvolaných elasticko-plastickou deformací [3, 6, 7, 8]:

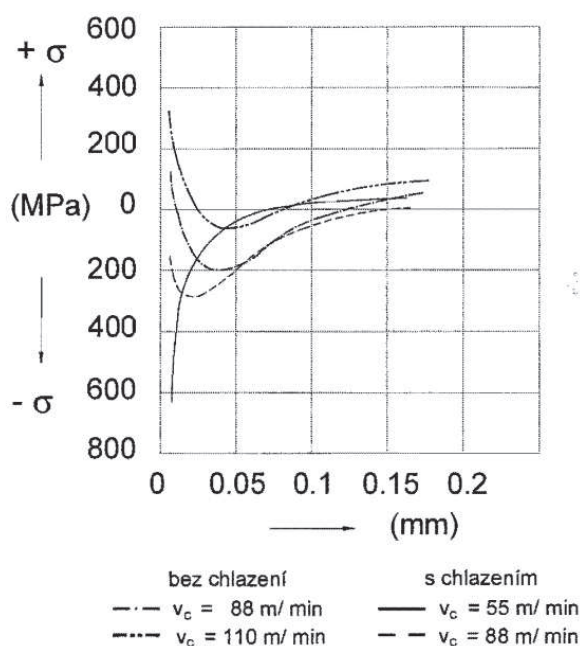
- zbytková napětí vzniklá v důsledku mechanických účinků jsou obvykle tlaková (záporná) a působí pozitivně, protože zvyšují mez únavy obrobku,
- zbytková napětí vzniklá v důsledku tepelného účinku jsou obvykle tahová (kladná) a působí negativně, protože jsou zdrojem povrchových trhlin, které vedou naopak k únavovým lomům.

2.1.4 Zbytkové napětí po frézování

Výsledky uvedené v téhle podkapitole byly získány při frézování titanové slitiny při čelním frézování nástrojem s pozitivními a negativními destičkami slinutých karbidů řady K, s chlazením a bez chlazení [3].

Čelní frézování hlavou o průměru 125 mm, osazenou destičkami s pozitivním úhlem čela, bez chlazení vykazovalo v povrchové vrstvě tahová napětí, která přecházela v hloubce cca 0,05 mm v napětí tlaková. Tato napětí se v hloubce 0,1 mm blížila nule a přecházela do napětí tahových [3].

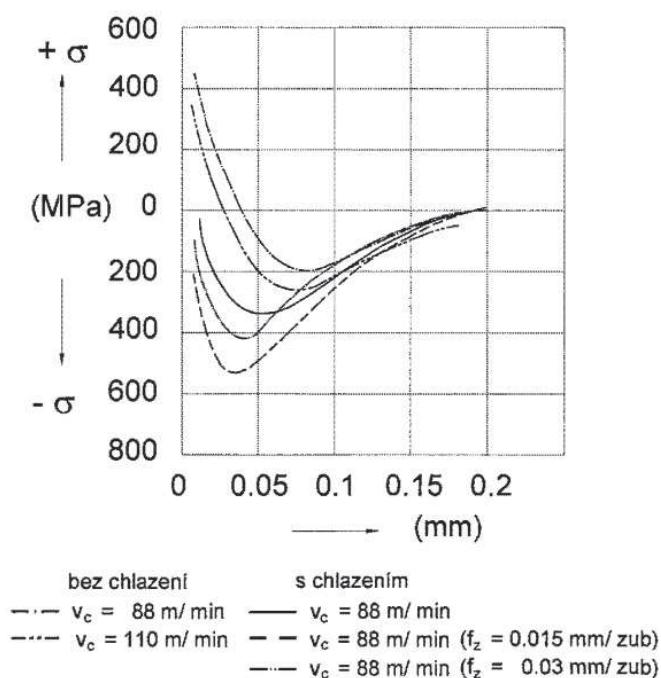
Chlazení za stejných podmínek vyvolávalo v povrchové vrstvě tlaková napětí, která směrem do hloubky materiálu přecházela do nuly a do tahu (obr. 2.2) [3].



Obr. 2.2 Zbytková napětí po čelním frézování frézou o průměru 125 mm [3].

Čelní frézování frézovací hlavou osazenou destičkami s negativními úhly čela, bez chlazení vyvolalo také tahová napětí v povrchové vrstvě, ale tato napětí přecházela v hloubce 0,05 mm do tlaku. Další průběh napětí směřoval k nulové hodnotě a do tahových napětí [3].

Chlazení za stejných podmínek vyvolává tlaková napětí v povrchové vrstvě, která v hloubce 0,2 mm přechází do nuly a do tahu (obr. 2.3) [3].



Obr. 2.3 Zbytková napětí po čelním frézování frézou s VBD s negativními úhly čela [3].

3 ZPŮSOBY ODSTRANĚNÍ / ELIMINOVÁNÍ VNITŘNÍHO PNUTÍ

Při výrobě konstrukčních celků a při mechanickém opracování materiálů vznikají ve výrobku vnitřní napětí, která se běžně odstraňují žíháním. Zejména při svařování nebo tuhnutí odlitků jsou vnitřní napětí velká. Jejich odstraněním, nebo alespoň podstatným snížením, se zvýší bezpečnost konstrukce proti porušení lomem, odstraní se náchylnost k tvoření trhlin, zvýší se mez únavy materiálu součásti a současně se sníží nebezpečí vzniku deformací při následném mechanickém obrábění. Snížení vnitřních napětí lze dosáhnout také přirozeným stárnutím výrobků. Tento proces však trvá velmi dlouho, což prodlužuje výrobní časy a zvyšuje výrobní náklady [1, 5].

3.1 Žíhání

Společným znakem četných způsobů žíhání je snaha k dosažení struktur tvořených rovnovážnými fázemi. Pro žíhání je tudíž charakteristická relativně malá ochlazovací rychlost, zpravidla ne vyšší, než odpovídá ochlazování na klidném vzduchu [1, 5].

Nejčastějšími cíli žíhání je vytvoření homogenní a jemnozrné struktury o dobré tvárnosti, houževnatosti a často i obrobitelnosti. Vhodným režimem žíhání lze potlačit chemickou heterogenitu, odstranit nežádoucí prvky a snížit úroveň vnitřních pnutí [1, 5].

Některé druhy žíhání jsou zařazovány do technologických postupů jako operace přípravné jako tzv. „mezižíhání“ (např. k usnadnění obrábění, k obnově plasticity při tváření za studena). Žíhání často bývá i konečnou operací tepelného zpracování, která určuje materiálové vlastnosti výrobku či polotovaru [1, 5].

3.1.1 Žíhání ke snížení vnitřního napětí - Ocel

Provádí se s cílem snížit nebo odstranit vnitřní pnutí, která vznikla ve výrobcích při jejich předcházejícím zpracování jako důsledek místního ohřevu (svařování), tváření za studena (např. rovnání), rozsáhlého třískového opracování nebo nerovnoměrného ochlazování výrobků složitých tvarů a větších rozměrů (odlitky, výkovky) [1, 5].

Žíhání se provádí při teplotách 500 až 650 °C, kdy ke snížení vnitřních pnutí, která korespondují s pružnou deformací mřížky, dochází lokální plastickou deformací v důsledku dostatečného snížení meze kluzu při uvedených teplotách. Obecně pro všechny způsoby platí, že prodleva na žíhací teplotě je závislá na její hodnotě, v daném případě při teplotách 600 až 650 °C postačuje doba 1 až 2 hod. Nemá-li při ochlazování vzniknout nové vnitřní pnutí, pak je nutné ochlazovat předměty z žíhací teploty pomalu (v peci) až do teploty 150 až 400 °C, a to podle tvárnosti oceli, velikosti předmětu a složitosti jeho tvaru [1, 5].

3.1.2 Žíhání ke snížení vnitřního napětí - Hliník

Účelem tohoto žíhání je snížit vnitřní pnutí u tvarově složitých výrobků získané nestejným ochlazováním z tvářecích teplot, vyvolané místním přehřátím při svařování nebo nerovnoměrným ochlazováním odlitku apod. Pohybuje se pod rekrytalizační teplotou při teplotách 300 až 400 °C. K poklesu vnitřního pnutí dochází již při teplotách 200 až 300 °C (prodleva 6 až 8 hod.), účinnější je však žíhání za teplot 300 až 400 °C s pomalým ochlazováním, kdy však může dojít k poklesu pevnosti. Z tohoto důvodu se většinou volí řízené ochlazování. Používá se u složitých výrobků tvářených za tepla nebo po svařování [1, 2, 5].

3.2 Vibrování

Oba uvedené způsoby snižování vnitřních napětí, tj. žíhání a přirozené stárnutí, lze nahradit použitím vibrací, což je kvazi přirozené stárnutí probíhající ve zkráceném čase. Firma VSR Industrietechnik GmbH Duisburg vyvinula a dále rozvíjí tento fyzikální princip odstraňování vnitřních napětí tak, aby byla hospodárně využitelná v průmyslu. V současné době je to již hospodárná alternativa ke komerčnímu žíhání a je používána pro stabilizaci rozměrů velkých součástí. Pro každý výrobek je stanovena optimální frekvence vibrací. Vyhodnocení budicí frekvence se provádí z analýzy vibrací. Frekvence vibrací je základním parametrem pro další postup zpracování obrobku [1, 5, 14].

Podstatou metody vibračního zpracování je rozkmitání součástky na rezonanční frekvenci, při které vnášená mechanická energie způsobuje elastické deformace. Při těchto deformacích v místech koncentrace napětí se překračuje mez kluzu materiálu. Následkem toho vzniká plastická deformace, dochází k přesunu napětí a k jeho celkovému snížení. Hlavním účinkem vibračního zpracování je zamezení deformace součásti po opracování, anebo při zatěžování v provozu. Oproti jiným metodám snižování zbytkového napětí má vibrační zpracování výhodu především ve velmi malé spotřebě energie a krátké době zpracování [1, 5, 14].

V makro-objemech a částečně také v mikro-objemech materiálu dochází působením vibrací ke snížení špiček vnitřních napětí a obrobek je bez deformací. Je tedy vhodné srovnávat metodu vibrační s přirozeným stárnutím obrobků. Vystárlé výrobky vykazují menší náchylnost ke vzniku deformací po třískovém obrábění. Toto je důležité zejména u přesných výrobků, kde jsou požadovány úzké tolerance rozměrů a tvaru. Výhoda obrobků bez vnitřních napětí se projeví také při obrábění např. deskovitých součástí malé tloušťky nebo dlouhých tenkých součástí malého průměru [1, 5, 14].

3.3 Stárnutí

Jedná se o mechanické blokování pohybu dislokací zachycováním dislokací rozpuštěnými atomy a precipitáty, zamezení pohybu dislokací uspořádáním na krátkou vzdálenost a zvětšením hustoty dislokací tak, aby docházelo k provázání dislokačních smyček. U všech těchto mechanismů zpevňování závisí jejich úspěšnost na omezení pohybu dislokací [1, 5].

Mechanického blokování pohybu dislokací lze nejjednodušeji dosáhnout zavedením drobných částic jiné fáze do krystalové mřížky. Tento proces nastává při zpevňování oceli, kdy se v železe vylučují částice karbidu železa, nebo při zpevňování hliníku, kdy precipitují částice Al_2Cu . Přesycený tuhý roztok má tendenci přejít do stabilního stavu, k čemuž potřebuje dodat vnější energii, kterou je teplo nebo i mechanická energie. Po jejím dodání se začíná tento přesycený roztok rozpadat [1, 2, 5].

Stárnutí probíhající při teplotě okolí, které však v letním období může dosahovat značně vysoké hodnoty, zvláště v uzavřeném prostoru nebo na přímém slunci, se nazývá přirozené stárnutí. Stárnutí probíhající za uměle zvýšené teploty se nazývá umělé stárnutí [1, 2, 5].

4 MĚŘENÍ VNITŘNÍHO PNUTÍ PŘI FRÉZOVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH DÍLŮ (POROVNÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN SKUPINY 5000, 6000 A 7000 PŘED A PO TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ)

Rozdělení měřicích metod pro hodnocení vlastností povrchové vrstvy na destruktivní a nedestruktivní není úplně správné, protože některé současné metody, např. měření zbytkových napětí, jsou částečně destruktivní [4, 13].

Zbytková napětí se určují pomocí RTG difrakční metodou, nebo metodou, kdy změny napětí a deformace se určí po vyvrtání díry o malém průměru.

4.1 Měření dvouosé napjatosti tenzometrickými růžicemi⁴

S rostoucími požadavky na znalost charakteru zbytkové napjatosti, působící na i pod povrchem strojních součástí, došlo ke vzniku a postupnému rozvoji mnoha experimentálních metod. Mezi nejrozšířenější polodestruktivní metody patří beze sporu metoda vrtání otvoru. V první polovině minulého století došlo ale také k rozvoji metody uvolňování sloupku, která je svojí podstatou velmi podobná metodě vrtání otvoru. V určitých směrech nahrazuje některé nedostatky metody vrtání otvoru, vlivem většího narušení tělesa je zase oproti metodě vrtání otvoru hůře aplikovatelná [4, 13].

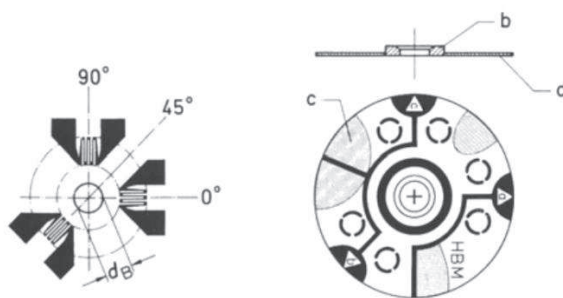
Tato metoda slouží k vyhodnocení homogenní a nehomogenní napjatosti po hloubce odvrtaného materiálu. Protože napětí je pouze abstraktní veličina, je potřeba jiná měřitelná veličina, která bude sloužit pro její vyhodnocení. Nejpoužívanější měřitelnou veličinou je délkové přetvoření, nejčastěji měřené pomocí odporových tenzometrů [4, 13].

Aby bylo možné stanovit velikosti a směry hlavních zbytkových napětí v závislosti na hloubce odvrtávané drážky, je potřeba tato uvolněná přetvoření měřit pro všechny aplikované úběry materiálu, a to ve třech směrech měřicích mřížek tenzometrické růžice. Tyto informace ale stále nejsou z hlediska vyhodnocení zbytkové napjatosti dostatečné. Pro určení velikostí zbytkových napětí z uvolněných deformací je potřeba znát také kalibrační koeficienty (činitele), respektive funkce, popisující jejich závislost zejména na velikosti otvoru, velikosti aplikovaného úběru, aktuální hloubce mezikružové drážky, typu použité tenzometrické růžice a mechanických vlastnostech vyšetřovaného materiálu. Jedná se o hodnoty, kterými musí být mimo jiné vynásobena uvolněná přetvoření tak, aby bylo možné stanovit velikosti hlavních zbytkových napětí [4, 13].

Kalibrační koeficienty (činitelé) se určují buď experimentálně (pro homogenní napjatost), nebo numerickou simulací pomocí metody konečných prvků (pro homogenní i nehomogenní napjatost) [4, 13].

4.1.1 Metoda vrtání otvoru

Je založena na přerozdělení pole napjatosti a deformace vyvolané vyvrtáním otvoru ve středu tenzometrické růžice. Pro tuto metodu se používají růžice se třemi vinutími s natočením 0°, 45° a 90° kolem středu (obr. 4.1) [13].



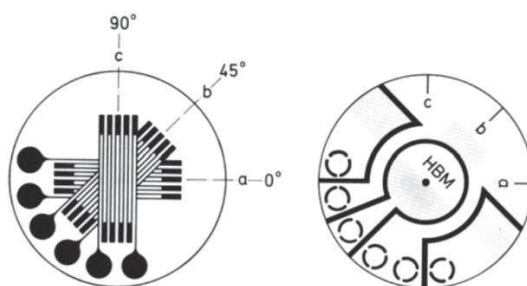
Obr. 4.1 Schéma tenzometrické růžice pro měření dvouosé napjatosti vrtáním otvoru [13].

Metoda vrtání otvoru vyžaduje vyvrtání malého otvoru o průměru 1 až 4 mm do středu tenzometrické růžice, do hloubky odpovídající přibližně průměru vrtaného otvoru [13].

Vrtání se provádí po krocích a na konci každého kroku se provede měření uvolněných deformací. Takto se získá rozložení zbytkových deformací v daném místě do určité hloubky pod povrchem součásti. Tyto získané informace se poté vyhodnocují dle různých teorií, na jejichž základě se určuje rozložení zbytkových napětí v daném místě [13].

4.1.2 Metoda uvolňování sloupku

Podstata metody spočívá v nalepení tenzometru (v tomto případě tenzometrické růžice) na povrchu součásti a v následném odvrtání (odfrézování) mezikruhovité drážky tak, že vzniká samostatný válcový sloupek se soustředně umístěnou tenzometrickou růžicí na svém povrchu. Tímto procesem odvrtávání dojde k narušení silové a momentové rovnováhy uvnitř sloupku, která se navenek projeví uvolněním přetvoření, měřitelným odporovými tenzometry (obr. 4.2). K odvrtávání mezikruhovité drážky se nejčastěji používají frézy nebo korunkové vrtáky (též označení korunkové vrtáky nebo děrovky) [4].



Obr. 4.2 Schéma tenzometrické růžice pro měření dvouosé napjatosti uvolňováním sloupku [13].

U metody uvolňování sloupku se místo odvrtaného otvoru frézuje mezikruhovita drážka o průměru 14 až 150 mm, do hloubky 0,25 až 1,5 násobku průměru sloupku, v jehož středu se na povrchu nachází připevněná tenzometrická růžice. Tento způsob měření vede k většímu uvolnění deformace a měřený signál je tak až o řád větší [4].

4.2 Další metody měření zbytkového napětí

Pro úplnost je třeba zmínit i další důležité metody používané k změření vlivu zbytkového pnutí [4, 13].

- **Metoda odstraňování povrchové vrstvy materiálu** – na tenkém vzorku tvaru hranolu s rovinnými povrchy se mechanicky ubírá celá povrchová vrstva a měří se deformace, která představuje odchylky od rovinnosti. Tato vrstva obsahuje určité zbytkové napětí a z důvodu momentové a silové rovnováhy uvnitř vzorku se její povrch deformuje.
- **Dělicí metody** – podstata vychází z relaxační metody, kde se na základě změřených deformací vyhodnocuje zbytkové napětí, které působilo na nově vytvořený povrch, před jeho vznikem.
- **Difrakční metody** – RTG a neutronová difrakce – princip nedestruktivních metod spočívá v určení mřížkových deformací a jejich přepočtu na napětí pomocí vztahů lineární teorie elasticity. Jedná se o velmi perspektivní, ale nesnadně proveditelné metody. Dají se získávat informace o napjatosti v povrchové vrstvě materiálu tloušťky 1 až 10 μm .
- **Ultrazvukové metody** – jsou založeny na přibližně lineární změně rychlosti šíření zvuku v kovech v závislosti na jeho namáhání. Při použití Rayleighových vln zasahují akustické vlny do hloubky přibližně 1 mm při frekvenci 3 MHz.
- **Magnetické metody** – další z řady nedestruktivních metod je využitelná pouze pro měření feromagnetických materiálů a je založena na principu Barkhausenova jevu nebo magnetostrikce. Při použití metody Barkhausenova šumu se měřená hloubka pohybuje od 0,01 mm do 3 mm. Pomocí magnetostrikční metody při kmitočtu 50 Hz je ekvivalentní měřená hloubka 1 až 2 mm, při 5 kHz je to 0,1 až 0,2 mm.
- **Koroze pod napětím a difuze vodíku do povrchové vrstvy** – obě metody využívají změn vyvolaných chemickými procesy.

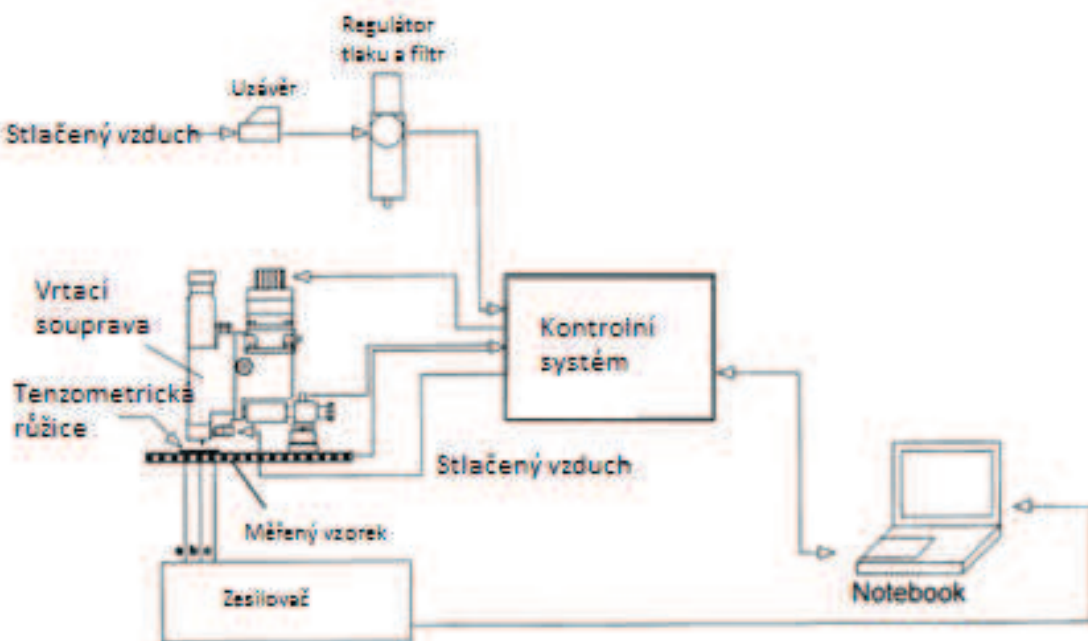
4.3 Samotné měření

Pro měření zbytkového napětí byla zvolena metoda vrtání otvoru kvůli rozměrům vzorků, protože je vyšetřováno napětí u tenkostěnných součástí. Pro zbytkové napětí způsobené obráběním je tato metoda plně dostačující. V tomto měření byly porovnávány vlivy zvolených zástupců hliníkových slitin po hrubování, po následném žíhání na odstranění zbytkových napětí a po dokončování.

Měření bylo prováděno na soupravě MTS 3000 firmy SINT Technology. Byly použity tenzometrické růžice 1-RY61-1.5/120S, jedná se o růžici $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ pro určování zbytkové napjatosti vysokorychlostním odvrtáváním, s mřížkami tenzometrů o délce 1,5 mm, jmenovitým odporem 120 Ohmů. Otvory byly vrtány frézami potaženými wolframem 1-SINTCTT/1.

4.3.1 Měřicí souprava

Měřicí zařízení je poháněno stlačeným vzduchem, který je přiváděn z kompresoru přes sušičku vzduchu. Mezi sušičkou vzduchu a kontrolním zařízením je měřen tlak vzduchu, který je regulován na požadovanou hodnotu otáček poháněné turbíny. Podle diagramu na obr. 4.3 je ke kontrolnímu zařízení zapojen tenzometr na vzorku, samotné vrtací zařízení a počítač.



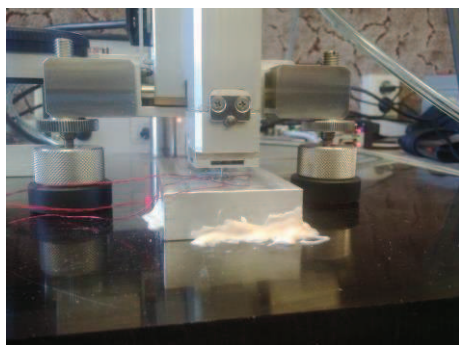
Obr. 4.3 Blokový diagram MTS3000 systému [12].

4.3.2 Parametry měření

Jednotlivé vzorky měly počáteční rozměry 100 x 50 x 20 mm. Po hrubování s úběrem vrstvy 3 mm byl měřený rozměr 100 x 50 x 17 mm a po dokončování s úběrem vrstvy 0,5 mm byl konečný rozměr vzorku 100 x 50 x 16,5 mm.

Otáčky frézy se při měření pohybují mezi 20 000 ot/min a 30 000 ot/min.

Vzorky byly měřeny vrtáním do hloubky 1 mm po krocích 0,067 mm. Po každém kroku se měří voltampérová charakteristika jednotlivých tenzometrů v růžici, z čehož se výpočtem získává prodloužení jednotlivých tenzometrů. Na obrázcích (obr. 4.4, obr. 4.5, obr. 4.6) jsou fotografie ze skutečného měření. Na prvním a posledním obrázku je vyvrtávací zařízení a na prostředním je samotná „frézička“ použitá k vyvrtávání.



Obr 4.4 Vrtání otvoru.



Obr 4.5 Použitá „frézička“.



Obr 4.6 Vrtací zařízení.

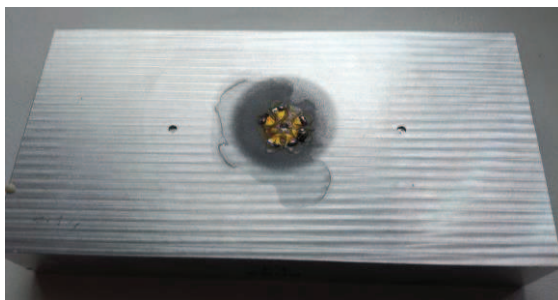
4.3.3 Postup měření zbytkového napětí

Vzorky se musí nejdříve připravit k měření. Povrch je třeba zbavit hrubých nečistot a povlaků pískováním a následně je odmaštěn benzínem, toluenem, acetonem nebo octanem ethylnatým pomocí tamponů z vaty nebo buničiny. Následuje nalepení tenzometru a letovací lišty a po vytvrzení lepidla jsou připájeny kontakty tenzometrů ke kontaktním drátkům z kontrolního zařízení.

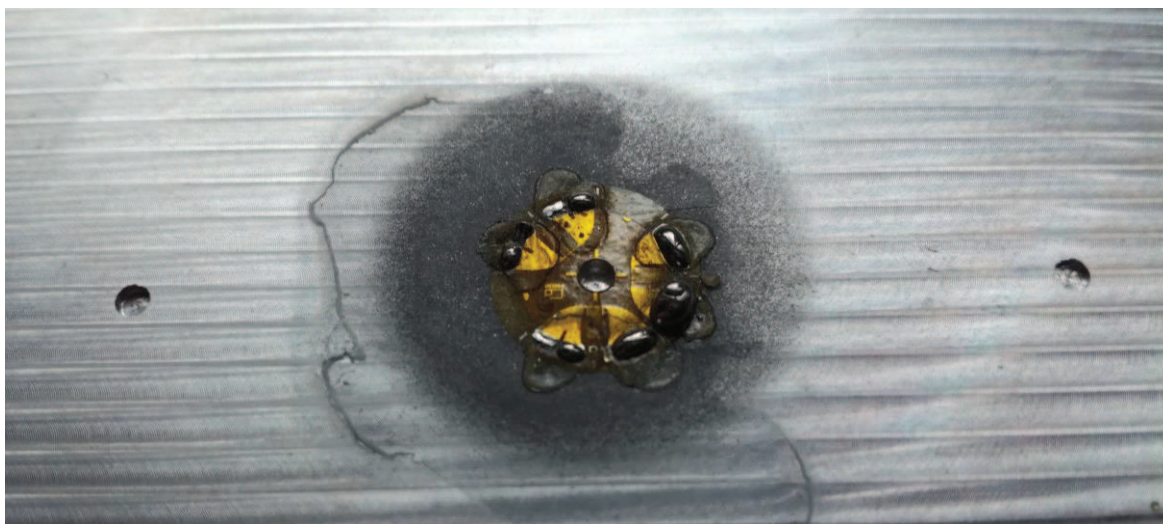
Připravený vzorek je připevněn k pevné podložce a pomocí optiky na vyvrtávacím zařízení je vřetenem nástroje nastaveno do přesné polohy terčíku na tenzometrické růžici. Po vyrovnaní měřicího zařízení s vřetenem kolmo na měřenou plochu vzorku a zadání všech potřebných materiálových parametrů je vše připraveno k měření. Po měření se odečte excentricita na čtyřech bodech vyvrtaného otvoru, které systém použije pro kompenzaci výpočtu.

5 STANOVENÍ VLIVU DANÝCH TYPŮ MATERIÁLU A POUŽITÝCH ŘEZNÝCH PODMÍNEK NA VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ PNUTÍ

Na vzorcích (obr. 5.1 a obr. 5.2) tří různých hliníkových slitin, které jsou ve velké míře používány v letecké a kosmické výrobě, bylo měřeno zbytkové napětí po hrubování, žíhání na odstranění vnitřního napětí a po dokončovacím frézování metodou vrtání otvoru za použití tenzometrických růžic firmy HBP měřicí technika s.r.o.



Obr. 5.1 Jeden z měřených vzorků.



Obr. 5.2 Detail vyvrtané tenzometrické růžice s viditelnými tenzometry.

5.1 Vliv vlastností materiálu

Zbytkové napětí bylo měřeno na třech vzorcích různých hliníkových slitin po třech technologických operacích. Jednalo se o slitiny 5083, 6082 a 7075. K výpočtu zbytkového napětí ve vzorcích byly potřeba zadat do softwaru měřícího zařízení potřeba zadat materiálové vlastnosti, které jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Materiálové parametry měřených vzorků.

Vzorek	1.1	1.2	1.3
Materiál	5083 H111	6082 T651	7075 T7351
Youngův modul pružnosti E [GPa]	70	70	71
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	100	240	434
Poissonova konstanta μ [-]	0,33	0,33	0,33

K měření zbytkového napětí vzorků byla využita metoda vrtání otvoru pomocí tenzometrické růžice 1-RY61-1,5/120S. Otvor byl vrtán na odvrtávací soupravě MTS 3000 firmy SINT Technology pomocí frézy 1-SINTCTT/1 o průměru 1,6 mm s povlakem TiAlN. Zbytkové napětí bylo měřeno v patnácti hloubkách v otvoru hlubokém 1 mm.

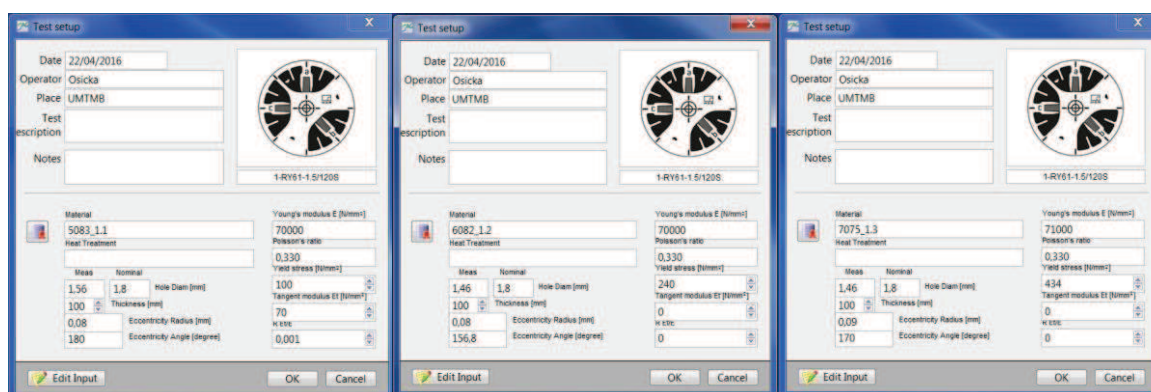
5.1.1 Zbytkové napětí po hrubování

První měření probíhalo po hrubovací operaci, při které byla odebírána tříska $a_p = 3$ mm. Vzorky byly frézovány monolitní karbidovou frézou Gühring $\phi 20/42$, $n = 120 \text{ min}^{-1}$, $f = 250 \text{ mm/min}$. Původní rozměry vzorků byly tedy obrobena na $100 \times 50 \times 17$ mm.

Zde se předpokládá, že při hrubování by měla být součást vystavena nejvyššímu zatížení z použitých technologických operací a tedy by do povrchu mělo být vneseno nejvyšší napětí.

Na všech měření ovlivněná oblast obráběním sahá maximálně do hloubky 0,2 až 0,3 mm.

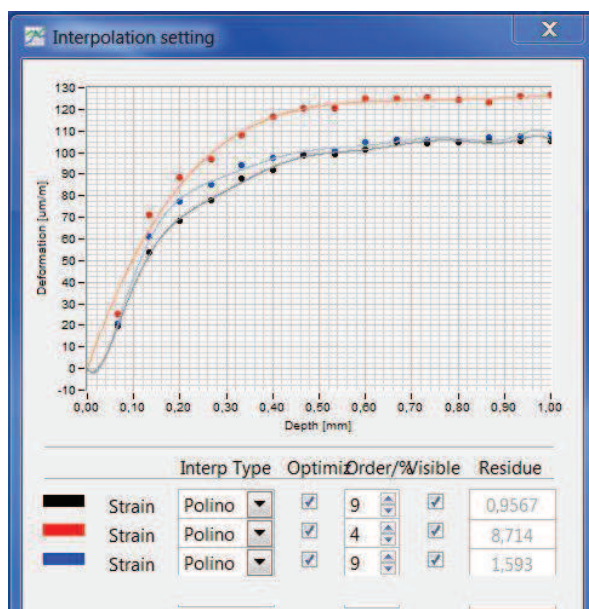
Na obr. 5.3 jsou vstupní parametry pro měření jednotlivých slitin po hrubovací operaci.



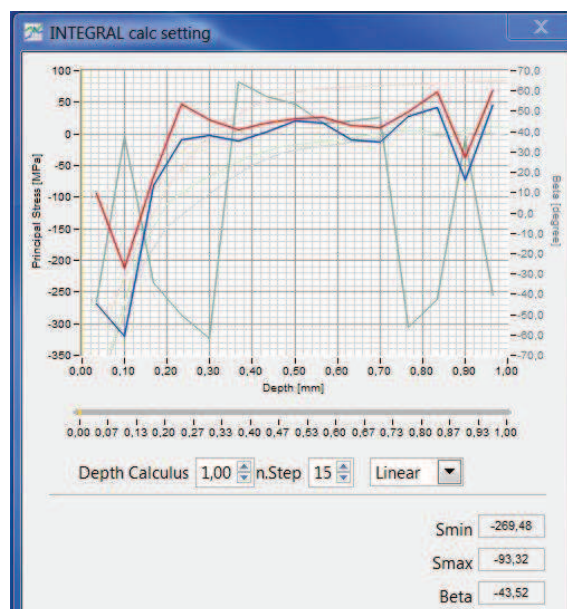
Obr. 5.3 Zadané vstupní parametry pro tři vzorky při prvním měření.

Hrubování vzorku 1.1: 5083 H111

Naměřené maximální napětí prvního vzorku (obr. 5.4, obr. 5.5) dosahuje více než trojnásobkům smluvní meze kluzu dané slitiny. Je tedy zřejmé, že byl povrch plasticky přetvořen až do hloubky 0,25 mm.



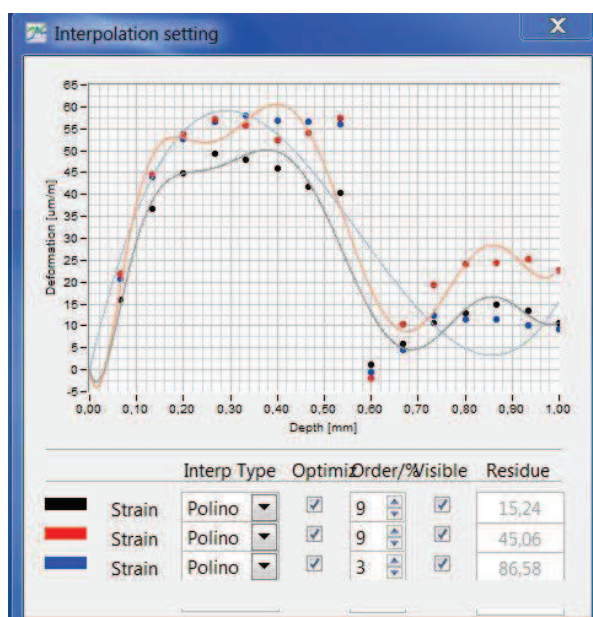
Obr. 5.4 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (hrubování vzorku slitiny 5083).



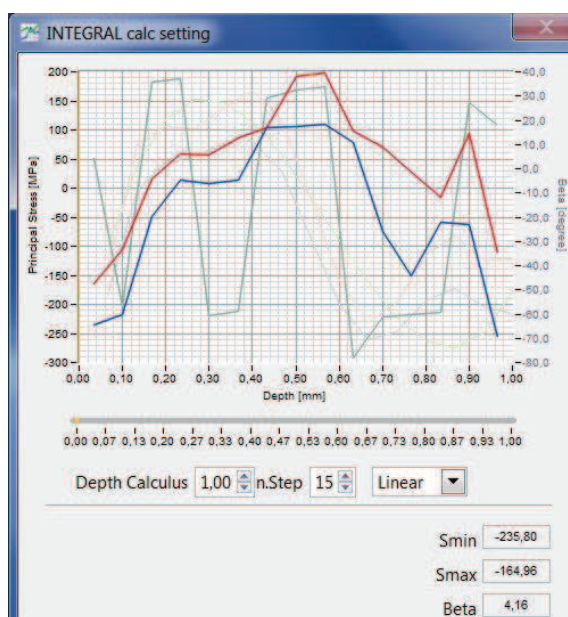
Obr. 5.5 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (hrubování vzorku slitiny 5083).

Hrubování vzorku 1.2: 6082 T651

Napětí vzorku slitiny 6082 má ve vyšších hloubkách značné výkyvy (obr. 5.6, obr. 5.7), které mohou být způsobeny vadami materiálu. Hrubováním je ovlivněna povrchová vrstva přibližně do 0,25 mm. Maximální napětí dosahuje těsně pod smluvní mez kluzu.



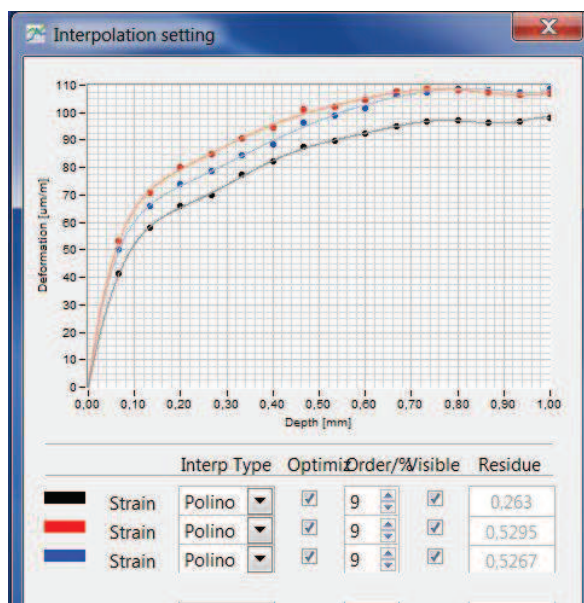
Obr. 5.6 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (hrubování vzorku slitiny 6082).



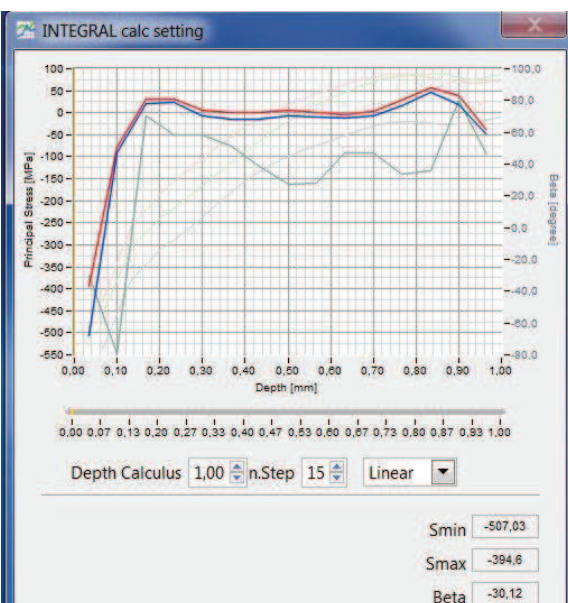
Obr. 5.7 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (hrubování vzorku slitiny 6082).

Hrubování vzorku 1.3: 7075 T7351

Velmi malá povrchová vrstva tloušťky 0,05 mm mohla být v plastickém stavu. Zde napětí (obr. 5.8, obr. 5.9), klesá k nule přibližně v hloubce 0,15 mm.



Obr. 5.8 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (hrubování vzorku slitiny 7075).



Obr. 5.9 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (hrubování vzorku slitiny 7075).

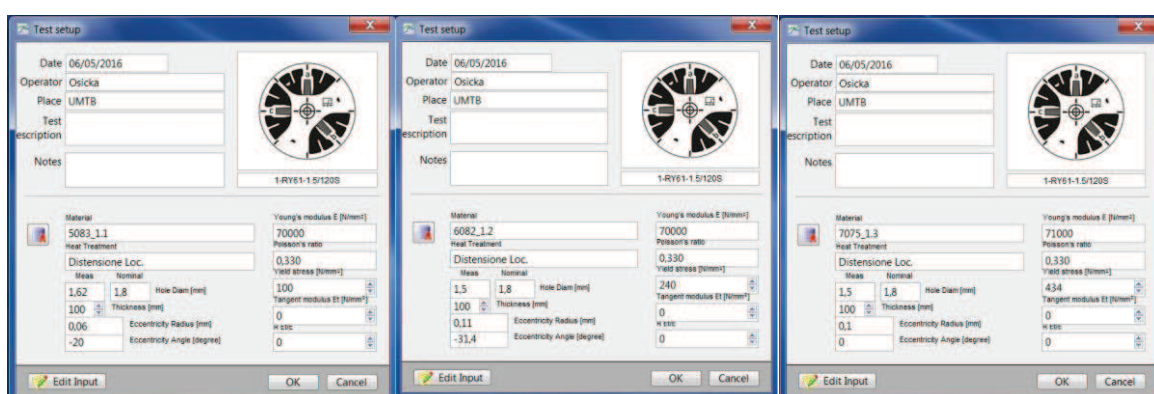
5.1.2 Zbytkové napětí po žihání na odstranění zbytkového napětí

Hrubované kvádry byly po hrubování tepelně zpracovány. Bylo použito žihání na odstranění vnitřního napětí. Materiál slitiny 5083 byl žihán při teplotě 380 °C s výdrží 2 hod. Vzorky slitiny 6082 a 7075 byly žihány při teplotě 160 °C s výdrží 4 hod.

Předpokládá se, že bude napětí ve vyžiháných vzorcích nižší, než naměřené napětí po hrubování. Zde se nabízí také otázka, do jaké míry jsou žihání těchto slitin mezi sebou porovnatelné, když se jedná o různé slitiny s různým chemickým složením. A kvůli tomu jsou tedy použity různé podmínky tepelné úpravy.

Všechna měření přibližně odpovídají měřením po hrubování. Napětí jsou přibližně o 20 % nižší. Napětí však sahá do větších hloubek pod povrchem.

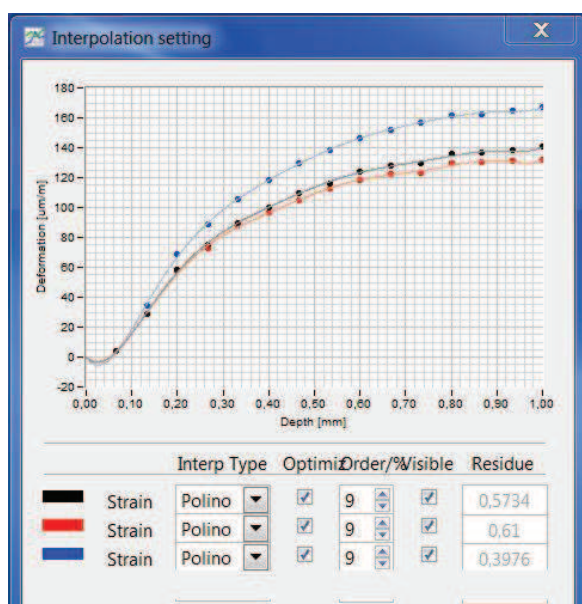
Na obr. 5.10 jsou vstupní parametry pro měření jednotlivých slitin po tepelné úpravě.



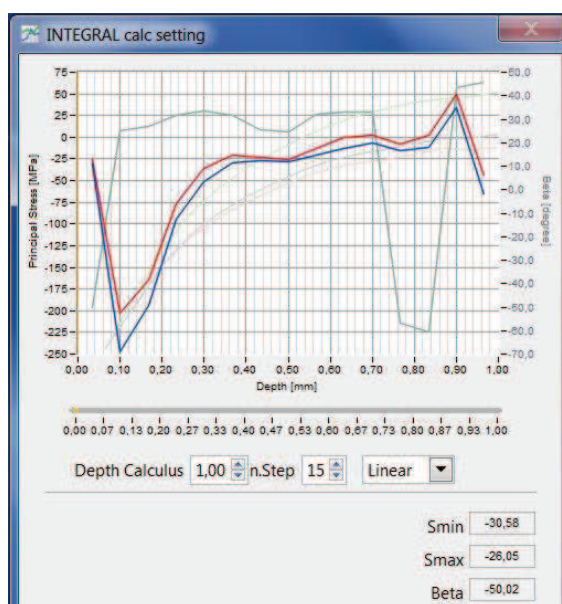
Obr. 5.10 Zadané vstupní parametry pro tři vzorky při druhém měření.

Žihání vzorku 1.1: 5083 H111

Po žihání prvního vzorku průběh napětí (obr. 5.11, obr. 5.12) klesl přibližně o 20 %. Hloubka ovlivněné oblasti však sahá k 0,3 mm.



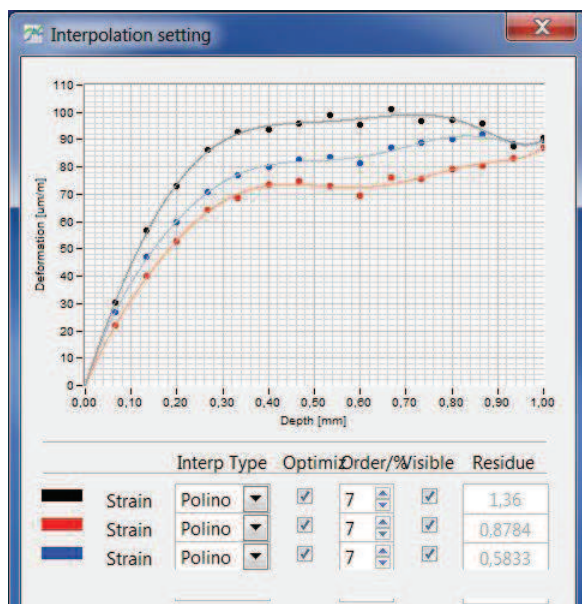
Obr. 5.11 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (žihání vzorku slitiny 5083).



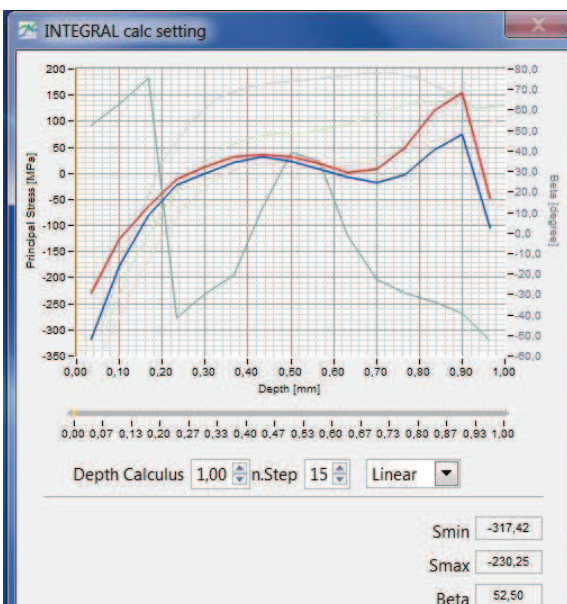
Obr. 5.12 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (žihání vzorku slitiny 5083).

Žihání vzorku 1.2: 6082 T651

Tvar křivek napětí (obr. 5.13, obr. 5.14) bohužel neodpovídá měření po hrubování. Od hloubky 0,1 mm je však vidět uvolnění napětí způsobené žiháním přibližně o 22 %.



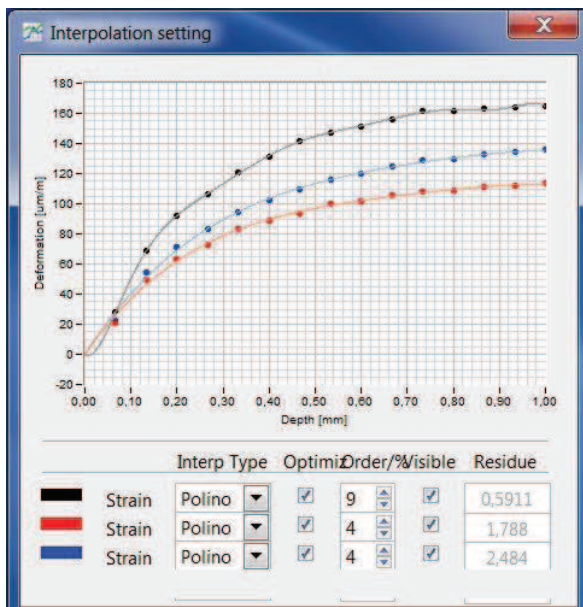
Obr. 5.13 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (žihání vzorku slitiny 6082).



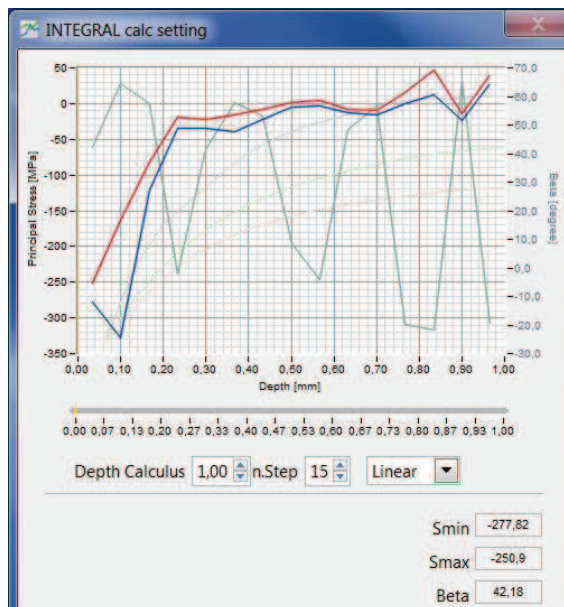
Obr. 5.14 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (žihání vzorku slitiny 6082).

Žihání vzorku 1.3: 7075 T7351

Po žihání slitiny 7075 na 380 °C s výdrží 2 hod je napětí značně sníženo (obr. 5.15, obr. 5.16). Naměřené zbytkové pnutí je přibližně o 60 % nižší.



Obr. 5.15 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (žihání vzorku slitiny 7075).



Obr. 5.16 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (žihání vzorku slitiny 7075).

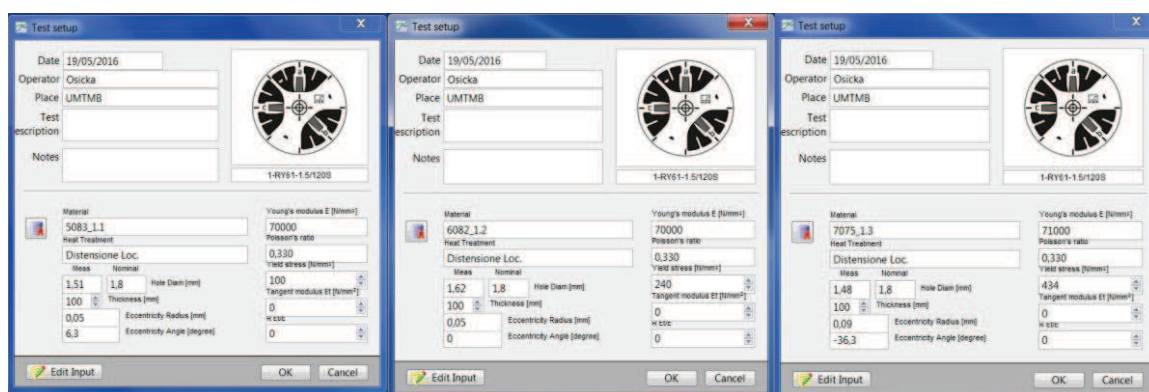
5.1.3 Zbytkové napětí po dokončování

Vzorky byly po změření napětí po tepelném zpracování dokončeny čelním frézováním. Při dokončovacím frézování byla odebírána tříska o hloubce $a_p = 1$ mm.

Předpokládá se, že bude napětí ve vyžiháných vzorcích nižší, než naměřené napětí po hrubování. Zde se nabízí také otázka, do jaké míry jsou žihání těchto slitin mezi sebou porovnatelné, když se jedná o různé slitiny s různým chemickým složením.

Odebráním 1 mm materiálu po vyžihání jsme odebrali povrchovou vrstvu, ve které již bylo zbytkové napětí po předchozích operacích a bylo do nového povrchu vloženo zbytkové napětí po dokončovacím frézování.

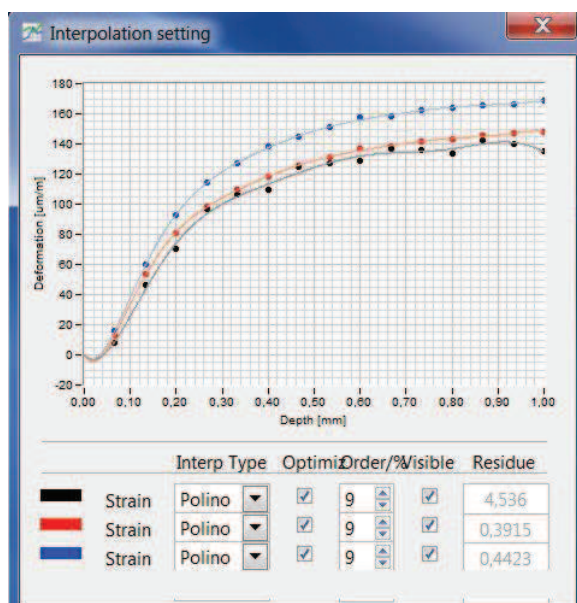
Na obr. 5.17 jsou vstupní parametry pro měření jednotlivých slitin po dokončování.



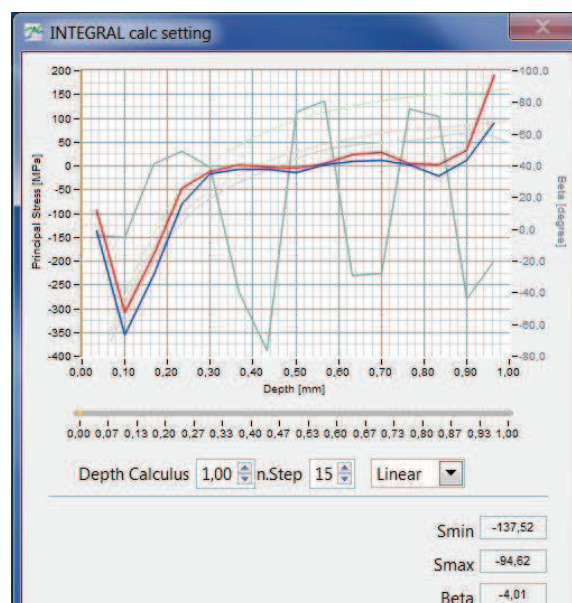
Obr. 5.17 Zadané vstupní parametry pro tři vzorky při prvním měření.

Dokončování vzorku 1.1: 5083 H111

Odfrézováním povrchové vrstvy tloušťky 1 mm pod povrchem vzniklo napětí (obr. 5.18, obr. 5.19), které podle grafického průběhu má vyšší tlakové napětí. Do 0,1 mm proběhla plastická deformace. Průběh napětí však působí více hladce bez výrazných výkyvů napětí.



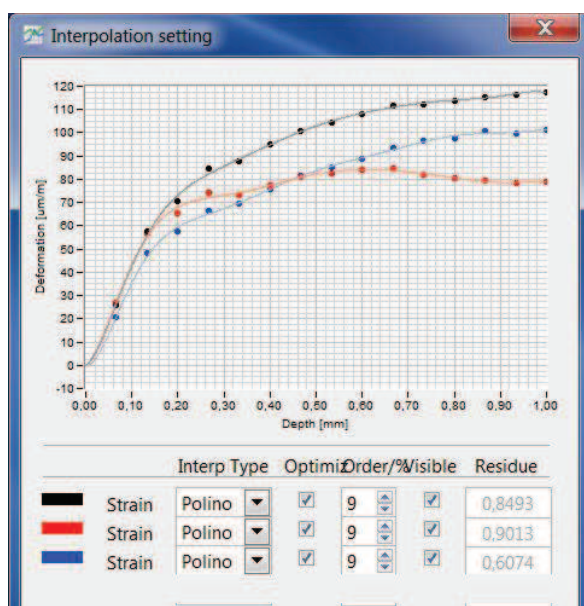
Obr. 5.18 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (dokončování vzorku slitiny 5083).



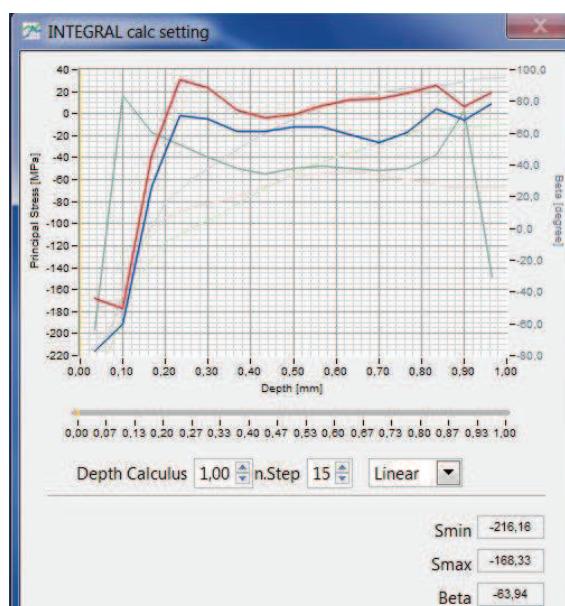
Obr. 5.19 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (dokončování vzorku slitiny 5083).

Dokončování vzorku 1.2: 6082 T651

Zbytková napětí působící ve vzorku slitiny 6082 (obr. 5.20, obr. 5.21) po dokončovací operaci dosahují přibližně stejných hodnot jako po hrubování. Do 0,1 mm pod povrchem probíhalo plastické přetvoření krystalové mřížky materiálu vzorku.



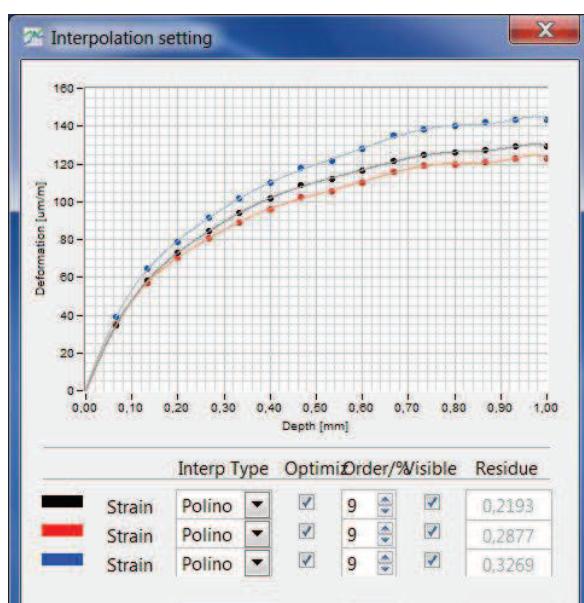
Obr. 5.20 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (dokončování vzorku slitiny 6082).



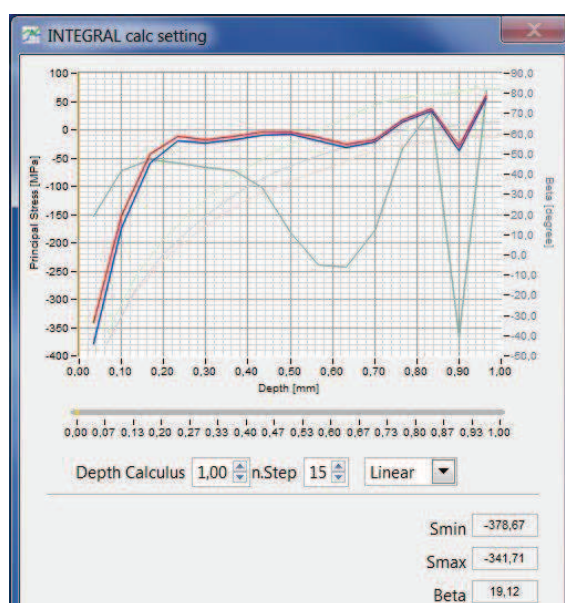
Obr. 5.21 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (dokončování vzorku slitiny 6082).

Dokončování vzorku 1.3: 7075 T7351

Po dokončení posledního vzorku hliníkové slitiny 7075 zůstalo v povrchové vrstvě nižší zbytkové napětí než po hrubování (obr. 5.22, obr. 5.23). V celé měřené hloubce proběhla pouze elastická deformace – tedy ve vzorku zůstalo nejvyšší tlakové napětí, které způsobilo elastickou deformaci (378,67 MPa).



Obr. 5.22 Grafická závislost deformace tenzometrů na hloubce vrtání (dokončování vzorku slitiny 7075).



Obr. 5.23 Grafická závislost zbytkového napětí vypočítaného z deformace (dokončování vzorku slitiny 7075).

5.2 Porovnání výrobních operací

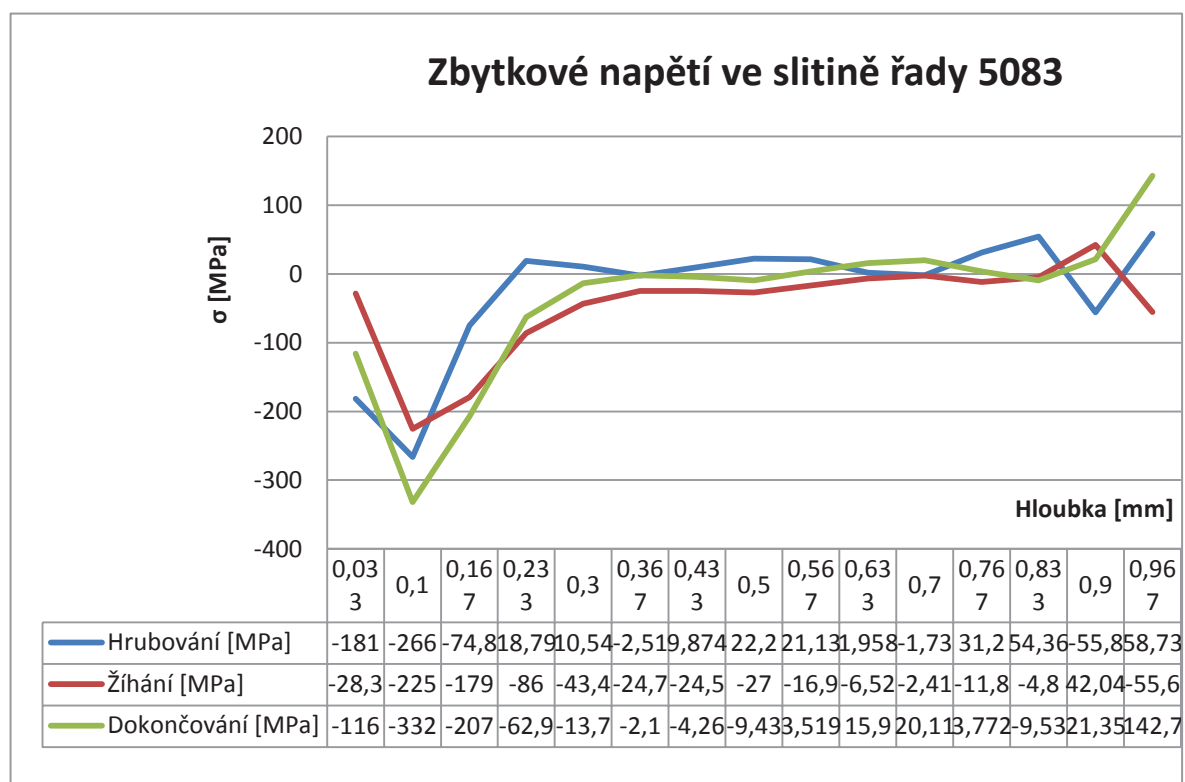
Pro grafické porovnání průběhů zbytkového napětí ve vzorcích po jednotlivých technologických operacích jsou naměřená data vložena do grafů pro jednotlivé měřené slitiny.

5.2.1 Slitina 5083

Průběhy měření ve slitině 5083 na obr. 5.24 ukazují hodnoty zbytkového napětí po třech testovaných technologických operacích:

- po hrubování vzorku bylo nejvyšší naměřené tlakové napětí 266 MPa - (Hrubování),
- po vyžihání vzorku na snížení vnitřního pnutí došlo ke snížení maximálního tlakového napětí. Tedy nejnižší maximum v porovnávaných technologiích 225 MPa - (Žihání),
- Po dokončovacím frézování vzorku bylo naměřeno nejvyšší tlakové napětí z porovnávaných technologických operací 332 MPa - (Dokončování).

Lomy na všech průbězích naměřených hodnot jsou způsobeny kluzem v povrchové vrstvě materiálu způsobeným překročením meze kluzu při frézování. V povrchové vrstvě do 0,1 mm tedy proběhla plastická deformace.

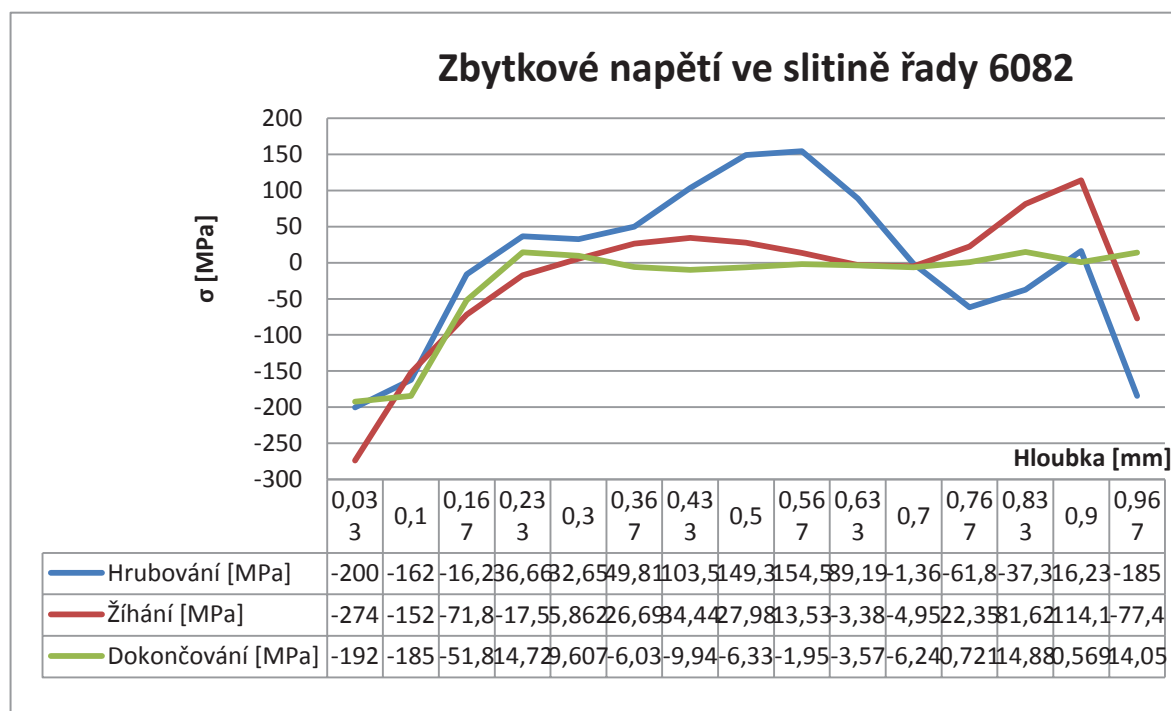


Obr. 5.24 Grafická závislost změřeného zbytkového napětí na vyvrtané hloubce po třech měřených výrobních operacích na vzorku slitiny 5083.

5.2.2 Slitina 6082

Průběhy měření ve slitině 6082 na obr. 5.25 ukazují hodnoty po testovaných technologických operacích:

- po hrubovacím frézování vzorku slitiny 6082 bylo naměřeno největší tlakové napětí 200 MPa. Na povrchu došlo k lomu průběhu napětí, protože došlo k „uvolnění“ vysokého napětí překročením meze kluzu slitiny - (Hrubování),
- po žíhání vzorku na snížení vnitřního napětí bylo naměřeno nejvyšší maximální tlakového napětí po použitých technologických operacích. Kde z nejistého důvodu nejspíš nedošlo ke kluzu v oblasti vrtání měřeného otvoru. Naměřeno tlakové napětí o hodnotě 274 MPa - (Žíhání),
- Po dokončovacím frézování vzorku bylo naměřeno nejvyšší tlakové napětí z porovnávaných technologických operací 192 MPa - (Dokončování).

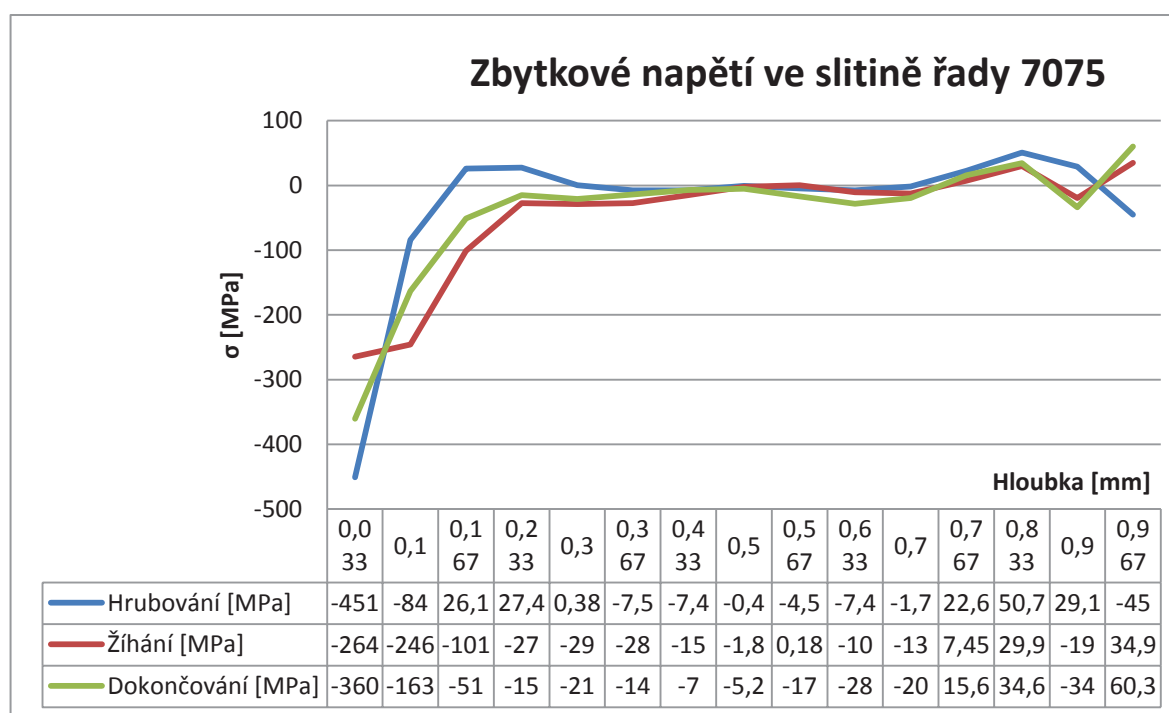


Obr. 5.25 Grafická závislost změřeného zbytkového napětí na vyvrtané hloubce po třech měřených výrobních operacích na vzorku slitiny 6082.

5.2.3 Slitina 7075

Průběhy měření ve slitině 7075 na obr. 5.26 ukazují hodnoty po testovaných technologických operacích:

- po hrubovacím frézování vzorku slitiny 7075 bylo naměřeno největší tlakové napětí 451 MPa. V oblasti měření nedošlo k lomu křivky, z čehož vyplývá, že od hloubky 0,33 mm již neprobíhala plastická deformace a zůstalo zde vysoké zbytkové napětí - (Hrubování),
- po žíhání vzorku na snížení vnitřního napětí bylo naměřeno nejvyšší maximální tlakového napětí 264 MPa. V místě vrtání probíhala plastická deformace při obrábění hlouběji, než na dalších dvou vrtech. Plastické přetvoření sahá přibližně do hloubky 0,1 mm - (Žíhání),
- po dokončovacím frézování vzorku bylo naměřeno nejvyšší tlakové napětí z porovnávaných technologických operací 192 MPa. Opět z průběhu měření ovlivněné oblasti je zřejmé, že do 0,033 mm hloubky neprobíhala plastická deformace způsobená obráběním - (Dokončování).



Obr. 5.26 Grafická závislost změřeného zbytkového napětí na vyvrtané hloubce po třech měřených výrobních operacích na vzorku slitiny 7075.

5.2.4 Shrnutí porovnání výrobních operací

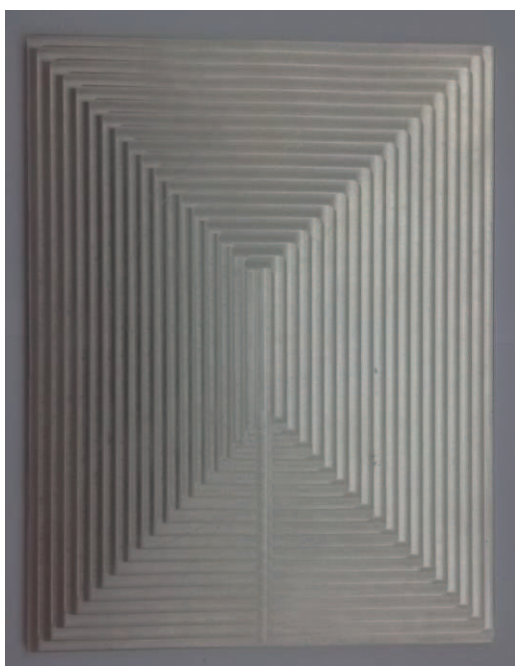
V těchto třech grafických závislostech se slučují tyto vlastnosti:

- Průběh napětí po hrubování je strmější než průběh hodnot po dokončovacím frézování. Z toho vyplývá, že zbytkové napětí po hrubování nezasahuje do menší hloubky, než napětí po dokončování, což je způsobeno jinými řeznými podmínkami.
- Zbytkové napětí se blíží nule u všech slitin a technologií v hloubce mezi 0,2 až 0,3 mm.

5.3 Vliv řezných podmínek

Pro porovnání vlivu průměru fréz na slitinách 5083 a 6082 bylo použito měření rovinnosti po frézování rovinné plochy vzorků rozměru 133 x 103 x 15 mm. Finální tloušťka vzorku po frézování byla 3 mm.

Dokončení rovinné plochy k měření bylo provedeno spirálovým frézováním (obr. 5.27 a obr. 5.28). Na vzorcích byly porovnávány dvě různé monolitní frézy, které se lišily svým průměrem. Dále mezi sebou byly porovnány dvě hliníkové slitiny (viz tab. 5.2).



Obr. 5.27 Frézování nástrojem $\varnothing 4$ mm.



Obr. 5.28 Frézování nástrojem $\varnothing 20$ mm.

Měření rovinnosti není spolehlivé k porovnání zbytkového napětí ve vzorcích. Zbytkové napětí deformuje součást a ovlivňuje rovinnost ploch na součásti. Lze takto získat alespoň hrubou představu o stavu napjatosti v součásti. Proto byla pro porovnání různých technologických podmínek obrábění porovnána rovinnost na vzorcích.

Měření bylo provedeno na 3D-měřicím přístroji CRYSTA APEXC od firmy Mitutoyo.

Z naměřené rovinnosti ploch uvedené v tab. 5.2 na vzorcích je jasné vidět velký rozdíl v měřených materiálech vzorků. Vzorky s nižší mezí kluzu hliníkové slitiny 5083 mají přibližně 4x nižší (tedy lepší) naměřenou rovinnost obrobene plochy.

Rozdíl rovinnosti u vzorků, kde byly srovnávány různé průměry čelních fréz nejsou tak velké, ale opakují se shodně na obou slitinách. Naměřená rovinnost u slitiny 5083 je pro průměr 20 mm o 22 μm vyšší než u frézy s průměrem 4 mm. U slitiny 6082 je rovinnost pro průměr 20 mm o 18 μm vyšší než pro průměr 4 mm.

Tab. 5.2 Měření rovinnosti obrobene plochy vzorků.

Číslo vzorku	Rozměry	Materiál	Řezné podmínky	Nástroj	Naměřená rovinnost
4.1	133 x 103 x 15	5083 H111	$a_p = 2 \text{ mm}$ $a_e = 2 \text{ mm}$ $v_c = 120 \text{ m/min}$ $f_z = 0,1 \text{ mm}$	Fréza $\varnothing 4 \text{ mm}$ JABRO TORNADO	0,046 mm
4.2	133 x 103 x 15	6082 T651	$a_p = 2 \text{ mm}$ $a_e = 2 \text{ mm}$ $v_c = 120 \text{ m/min}$ $f_z = 0,1 \text{ mm}$	Fréza $\varnothing 4 \text{ mm}$ JABRO TORNADO	0,199 mm
4.3	133 x 103 x 15	5083 H111	$a_p = 2 \text{ mm}$ $a_e = 10 \text{ mm}$ $v_c = 400 \text{ m/min}$ $f_z = 0,2 \text{ mm}$	Fréza $\varnothing 20 \text{ mm}$ JABRO TORNADO	0,068 mm
4.4	133 x 103 x 15	6082 T651	$a_p = 2 \text{ mm}$ $a_e = 10 \text{ mm}$ $v_c = 400 \text{ m/min}$ $f_z = 0,2 \text{ mm}$	Fréza $\varnothing 20 \text{ mm}$ JABRO TORNADO	0,217 mm

5.4 Výroba vzorků

Vzorky byly pro měření obrobeny ve výrobě firmy Frentech Aerospace s.r.o.

Použité stroje

Veškeré díly pro měření byly vyrobeny na konvenční frézce FNGJ 32 a měřené plochy byly obráběny na vertikálním CNC centru FJV 20 (obr. 5.29).



Obr. 5.29 Vertikální CNC centrum FJV 20 [10].

Parametry stroje:

- CNC systém: Mazatrol M-Plus,
- dosah v osách: X / Y / Z: 560 x 410 x 410 mm,
- rychloposuv X / Y / Z: 30000 / 30000 / 18000 mm/min,
- rozměr stolu: 800 x 460 mm,
- rychlost: 12000 ot/min,
- výkon: 22 kW.

Monolitní karbidové frézy Jabro-Tornado

Nové monolitní karbidové frézy Jabro-Tornado (obr. 5.30) byly vyvinuty pro frézování tvrdých materiálů a všeobecné obrábění. Tyto nástroje jsou navrženy primárně pro polodokončovací a dokončovací operace v kalených ocelích (48 až 65 HRC), ale snadno splní také nároky na přesnost v oblasti výroby forem a zápusťek, stejně jako v dalších odvětvích [9].

S dokonalejším povlakováním HXT, přísnějšími tolerancemi ($\pm 0,005$ mm) a menší házivostí v porovnání se svými předchůdci umožní fréza s kulovým čelem JH112 a toroidní fréza JH142 zvýšit úroveň obrábění díky dvojnásobné životnosti nástroje, bezkonkurenční přesnosti obrábění, vyšší produktivitě a spoustě dalších výhod, které tyto nástroje nabízejí [9].

Sortiment:

- celkem 130 fréz – 108 metrických a 22 palcových,
- řezné průměry od 2 mm po 12 mm a 0,063" až 0,5",
- velikosti rohových rádiusů u JH142 – 0,3 až 4 mm ($\pm 0,005$ mm),
- metrické délkové varianty: 2, 3 a 6 u JH142,
- metrické délkové varianty: 1, 2, 3, 4, 5 a 6 u JH112,
- délkové varianty v palcích: 1 a 2 u obou typů fréz.



Obr. 5.30 Monolitní karbidové frézy Jabro-Tornado [9].

6 DISKUZE

Z důvodu omezených finančních prostředků a značné finanční hodnoty měřicích zařízení proběhlo na každém vzorku po každé výrobní operaci pouze jedno měření. Pro představu finanční náročnosti měření jsou uvedeny v tab. 6.1 ceny produktů z cenové nabídky firmy HBP měřicí technika s.r.o. Kalkulace ceny samotného vrtání by byla až 5000 Kč za jedno měření.

Tab. 6.1 Cenová nabídka firmy HBP měřicí technika s.r.o. k datu 10. 3. 2016.

Popis produktu	Kód produktu	Množství	Celková cena
Frézy potažené karbidem wolframu [5 ks]	1-SINTCTT/1	1 bal	2 520,00 Kč
Tenzometrická růžice 0°/45°/90° pro určování zbytkové napětí vysokorychlostním odvrtáváním, 5 kusů v balení.	1-RY61-1.5/120S	2 bal	9 576,00 Kč

Původně bylo v plánu provedení 51 měření. Mělo se měřit pět zástupců slitin hliníku řady 5000, 6000 a 7000 a to po hrubování, po žíhání na odstranění zbytkového napětí a po dokončování. Dále bylo původním záměrem porovnat také šířku řezu a_p a každé z těchto zmíněných měření mělo být provedeno třikrát.

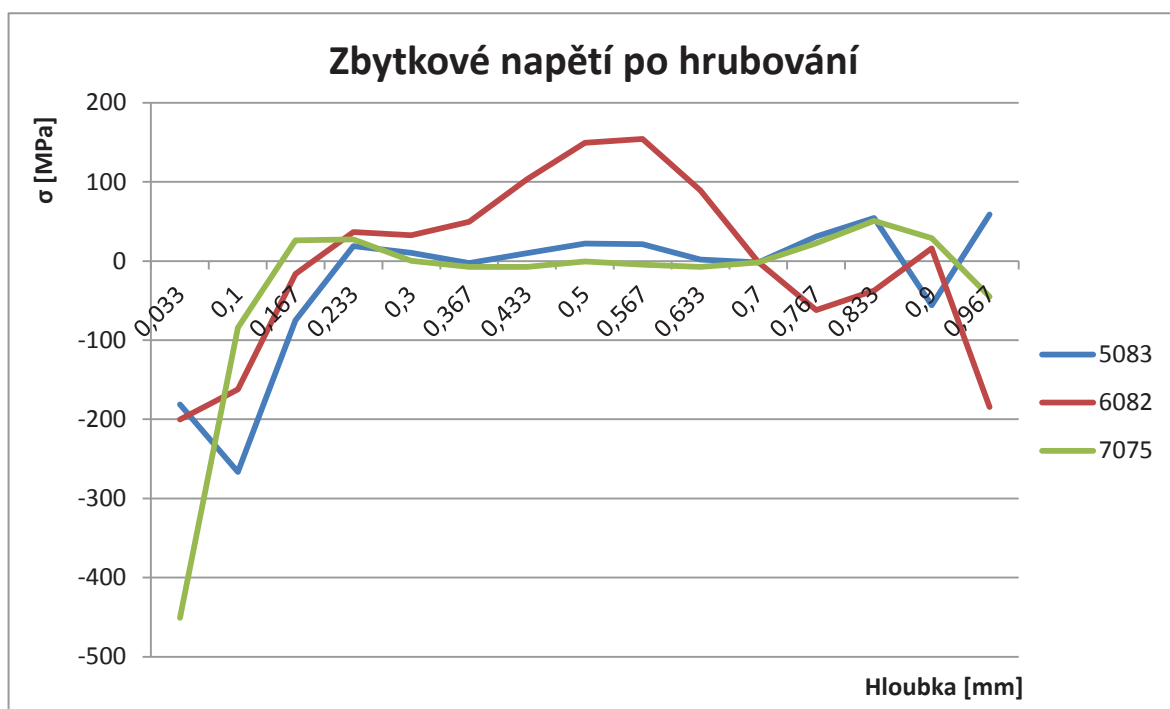
Pro alespoň minimální reprezentativnost měření by bylo potřeba provést minimálně každé měření třikrát, lépe pětkrát, kdy by bylo možné alespoň určit většinové hodnoty výsledků.

Vzhledem k tomu, že měření nemůže být opakováno ve stejné poloze vzorku jsou tato měření také závislá na strukturních vadách v materiálu. Výsledky ukázaly v jednom vzorku značný výkyv napětí, který nejspíš znamenal mechanickou vadu materiálu (nejspíš trhlinka). Tudíž porovnávání jednotlivých operací na jednom vzorku je také obtížné, pokud je testování omezeno pouze na jedno měření.

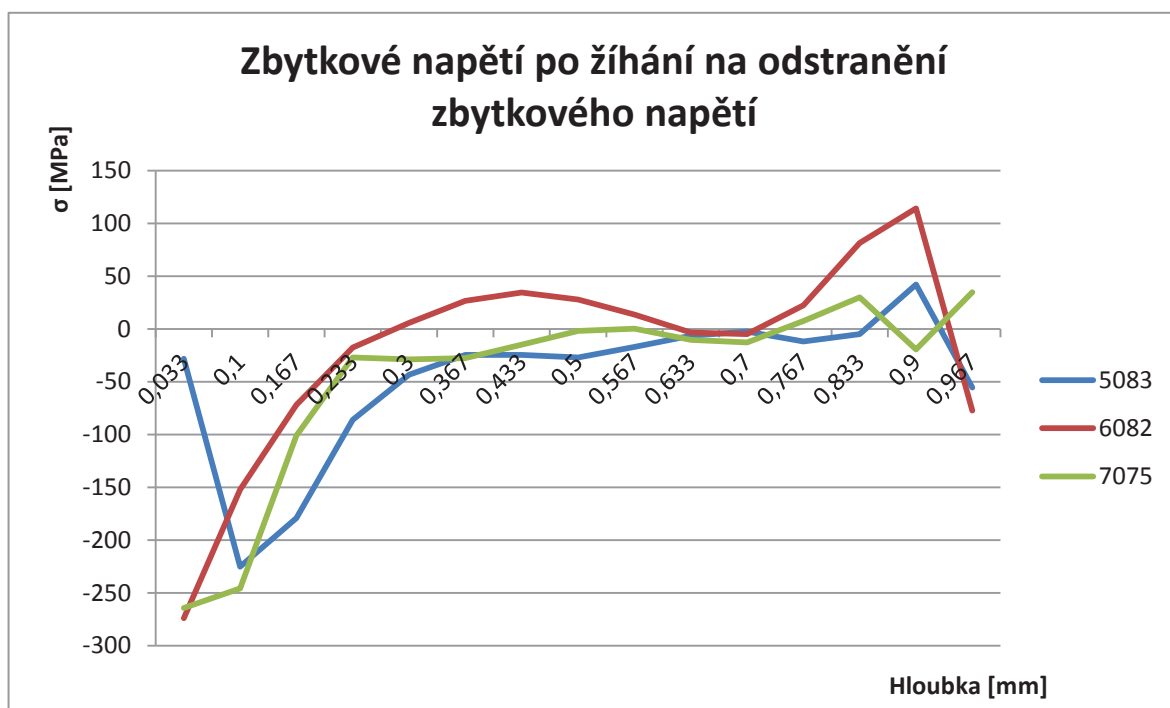
Je možné ale takto získat alespoň přibližnou představu o napětí, protože se znalostmi základních fyzikálních a chemických dějů v materiálu lze do značné míry napomoci k ověření pravdivosti (přesnosti) výsledků.

Při interpretaci výsledků je také potřeba uvažovat fakt, že měřené výsledné zbytkové napětí je dáno jak napětím vloženým vlastním procesem obrábění, tak zbytkovým napětím, které bylo v materiálu před obráběním způsobeno výrobou polotovaru pro materiál.

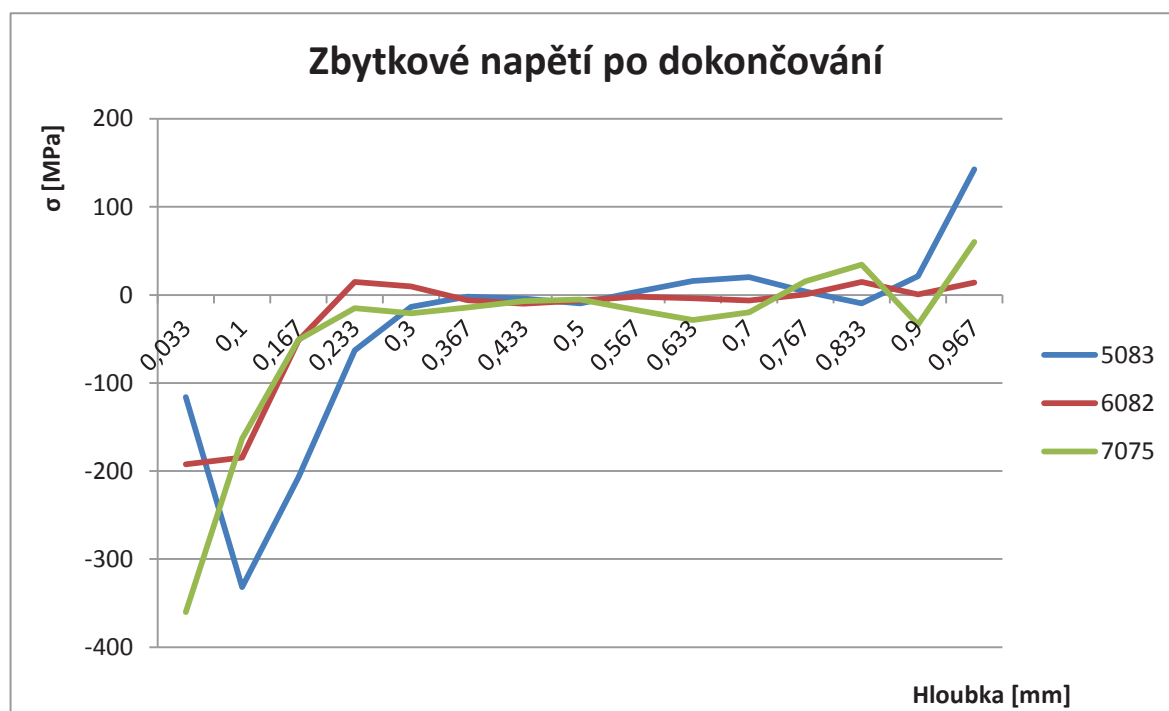
Výsledkem porovnání slitin hliníku (obr. 6.1, obr. 6.2, obr. 6.3) z hlediska zbytkového napětí po čelním frézování plochy má slitina řady 5083 nejnižší hodnoty napětí u obrobeného povrchu. Z praxe a také z měření rovinnosti na vzorcích z toho vyplývá, že je toto hledisko nejdůležitější pro výslednou kvalitu povrchu. Je však důležité brát v potaz vysokou hodnotu tlakového napětí, které bylo naměřeno 0,1 mm pod povrchem, které může způsobit vadu materiálu.



Obr. 6.1 Grafická závislost zbytkového napětí po hrubování na hloubce v materiálu.



Obr. 6.2 Grafická závislost zbytkového napětí po žíhání na odstranění vnitřního pnutí na hloubce v materiálu.



Obr. 6.3 Grafická závislost zbytkového napětí po dokončování na hloubce v materiálu.

Nakonec byla porovnávací metodou srovnána rovinnost čtyř vzorků, které byly obrobeny dvěma různými průměry fréz. Tento parametr vlivu obrábění na zbytkové napětí je v praxi považován, že má na zbytkové napětí největší vliv. Toto měření ukázalo převážný vliv materiálu na výslednou hodnotu zbytkového napětí. Nicméně rovinnost se objevovala horší u vzorků obráběných frézou o větším průměru.

- při obrábění vzorku materiálu 5083 frézou o průměru 4 mm byla naměřena rovinnost 0,046 mm,
- při obrábění vzorku materiálu 6082 frézou o průměru 4 mm byla naměřena rovinnost 0,199 mm,
- při obrábění vzorku materiálu 5083 frézou o průměru 20 mm byla naměřena rovinnost 0,068 mm,
- při obrábění vzorku materiálu 6082 frézou o průměru 20 mm byla naměřena rovinnost 0,217 mm.

Z čehož vyplývá, že při čelním frézování použití větší frézy způsobí méně kvalitní povrch, než použití menší frézy.

Je ale na zváženu, jak malé průměry fréz se vyplatí v praxi používat s ohledem na kvalitu povrchu, protože použitím menšího průměru frézy se zvýší strojní čas obrábění a zvyšuje se opotřebování nástroje.

6.1 Návrhy pokračování řešení

Z výsledků měření a porovnávání je jasné, že na zbytkové napětí mají převážný vliv vlastnosti obráběného materiálu. Z praxe je však známo, že na výsledné zbytkové napětí obrobku mají vliv i další technologické parametry:

- průřez odebírané třísky A_D ,
- geometrie nástroje (poloměr špičky, řezné úhly),
- řezná rychlost v_c ,
- posuv f .

K realizaci těchto měření bohužel nebyly k dispozici dostatečné finanční prostředky.

ZÁVĚR

Odvrtávací metodou bylo měřeno napětí ve třech vzorcích ze tří hliníkových slitin 5083, 6082 a 7075. Jednotlivé vzorky těchto materiálů byly měřeny po hrubování, následném žihání na odstranění vnitřního napětí a po dokončování.

- U slitiny s nejnižší mezí kluzu 100 MPa z měřených vzorků – 5083, dosahovala oblast plastického přetvoření do hloubky až 0,1 mm. Avšak hodnota stávajícího zbytkového napětí pod touto hloubkou dosahovala až 332 MPa po dokončování.
- U slitiny s mezí kluzu 200 MPa – 6082 bylo naměřeno nejnižší napětí ze tří porovnávaných slitin. Nejvyšší hodnota byla 274 MPa tlakového napětí. Plastická deformace však sahala pouze do 0,033 mm.
- U poslední slitiny 7075 s mezí kluzu 434 MPa bylo naměřeno nejvyšší napětí až 451 MPa. V měřené oblasti téměř neprobíhalo plastické přetvoření.

Měření ukázalo, že obráběním bylo ovlivněno podpovrchové napětí až do hloubky 0,3 mm materiálu u všech vzorků a procesů. Pouze napětí po hrubování dosahovalo převážně jen do 0,2 mm hloubky.

Pouhým porovnáním naměřené rovinnosti je viditelný společný znak vlivu materiálu. Rovinnost na vzorcích materiálu 6082 byla naměřena přibližně 4x vyšší, než naměřené hodnoty vzorků materiálu 5083.

Také lze porovnat vliv průměru fréz. Rovinnost u frézy o průměru 20 mm je přibližně o 20 μm horší, než na ploše vzorku obráběného frézou o průměru 4 mm. Závěrem lze říct, že čím větší má použitá fréza průměr, tím horší rovinnost bude mít daný frézovaný povrch obrobku.

Pokud je možný výběr materiálu při výrobě dílu, je z hlediska výsledné kvality rovinnosti povrchu vhodné použití materiálu s nižší mezí kluzu. Z porovnávaných materiálů byl materiál řady 5083 z tohoto hlediska nejlepší.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II.* 2. upr. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [2] MICHNA, Š. a kol. *Encyklopedie hliníku.* 1. vyd. Prešov: Adin, s. r. o., Prešov 2005, 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [3] BUMBÁLEK, Bohumil. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci* [online]. Brno. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [4] CIVÍN, A.: Komplexní teoretická analýza metody sloupku pro zjišťování zbytkových napětí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 130 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. MILOŠ VLK, CSc.
- [5] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování.* 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. 272 s. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [6] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění. SNTL/ALFA Praha, 3. Vyd., 1982, s.237.*
- [7] FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření, a nástroje.* Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [8] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. *Příručka obrábění-kniha pro praxe.* Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. Z: Modern Metal Cutting – A practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [9] Seco Tools CZ. MM Průmyslové spektrum [online]. 7. září 2016. Nové možnosti frézovacích nástrojů. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-moznosti-frezovacich-nastroju.html>
- [10] *Bogue Machine Company* [online]. Albuquerque, 2001 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://boguemachine.com>
- [11] *Termomechanika technologických procesů* [online]. Plzeň: Nové technologie – výzkumné centrum Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz>
- [12] *MTS3000 – Restan: Automatic System for Residual Stress Measurement by Hole-Drilling.* Calenzano, 2015, 12 s. [cit. 2017-05-25].
- [13] CIVÍN, A. Stanovení zbytkové napjatosti metodou vrtání otvoru s využitím MKP. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 93s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Hlavoň, Ph.D.
- [14] ZIMMER, Wolfgang. MM Průmyslové spektrum [online]. 1. září 2010. Vibrace odstraňují vnitřní napětí v materiálech. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vibrace-odstranuji-vnitri-napeti-v-materialech.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ČSN	[-]	Chráněné označení českých technických norem
EN	[-]	Evropská norma
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	Průřez třísky
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
$R_{P0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
a_e	mm	Radiální hloubka řezu
a_p	mm	Axiální hloubka řezu
f	mm/min	Posuv
f_z	mm	Posuv na zub
h_e	mm	Výška ovlivněné oblasti obráběním
r_n	mm	Rádus špičky řezného nástroje
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
ϵ	[-]	Relativní (poměrné) prodloužení
μ	[-]	Poissonova konstanta
σ	[MPa]	Napětí
\varnothing	[mm]	Průměr

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výstup měření rovinnosti vzorku slitiny 5083 obráběného frézou průměru 4 mm.
Příloha 2 Výstup měření rovinnosti vzorku slitiny 6082 obráběného frézou průměru 4 mm.
Příloha 3 Výstup měření rovinnosti vzorku slitiny 5083 obráběného frézou průměru 20 mm.
Příloha 4 Výstup měření rovinnosti vzorku slitiny 6082 obráběného frézou průměru 20 mm.
Příloha 5 Materiálové listy slitin 5083 a 6082 (vybrané strany).

PŘÍLOHA 1

Výstup měření rovinnosti vzorku slitiny 5083 obráběného frézou průměru 4 mm.

P.V. rovinnost 2 1, [mm]		Rovinnost: Rovina (1) Gauss	
Jméno uživatele	Datum a čas		
Cílo dílu	Admin		
Sériové číslo	5083j		
MONOLITNÍ FRÉZA Ø4		Protokol	
		Výrobce přikaz	

- Rovina
- Zóna tolerance
• Bod mimo tol.
o Min./max. bod

Zóna tolerance	0.000	Horní tol.	0.100
Dolní tol.			0.100
Počet bodů			25
Min. max. bod			1 / 13
Std. odch. * 4			0.067
Rovinnost			0.046
Min. vzd.	-0.022	Max. vzdal	0.024
X	7.551	X	66.243
Y	4.911	Y	49.042
Z	-0.022	Z	0.016

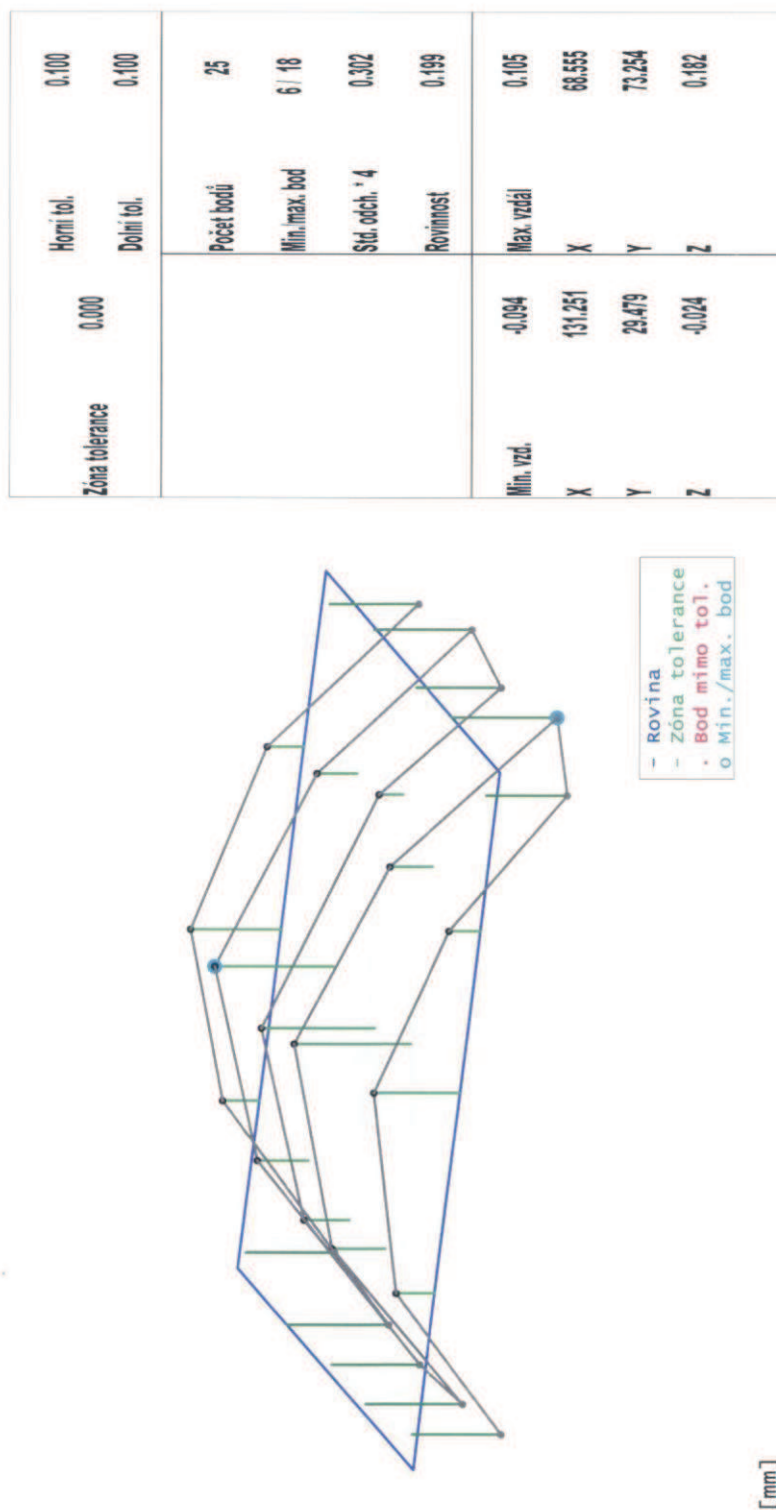
[mm]

GEOPAK, v3.2.R15

Strana 1

Výstup měření rovinnosti vzorku slitiny 6082obráběného frézou průměru 4 mm.

P.V. rovinnost 2 1. [mm]		Rovinnost: Rovina (1) Gauss	
Jednoto užívající		Datum a čas	
		Protokol	
Číslo dílu	MONOLITNÍ FRÉZA Ø4	Výrobční příkaz	
Seriové číslo			
		Admin	3.5.2016 13:35
		6082	



Výstup měření rovinnosti vzorku slitiny 5083 obráběného frézou průměru 20 mm.

P.V. rovinnost 2 1, [mm]		Rovinnost: Rovina (1) Gauss	
Jméno uživatele	Admin	Datum a čas	3.5.2016 13:39
Číslo dílu	MONOLITNÍ FRÉZA Ø20		
Sériové číslo	5083	Protokol	
Výrobni příkaz			

- Rovina
- Zóna tolerance
• Bod mimo tol.
o Min./max. bod

Zóna tolerance	0.000	Horní tol.	0.100
		Dolní tol.	0.100
Počet bodů	25		
Min./max. bod	21 / 13		
Std. odch. ±	0.091		
Rovinnost	0.068		
Min. vzd.	-0.034	Max. vzdal	0.034
X	5.966	X	66.247
Y	98.302	Y	49.042
Z	0.072	Z	0.130

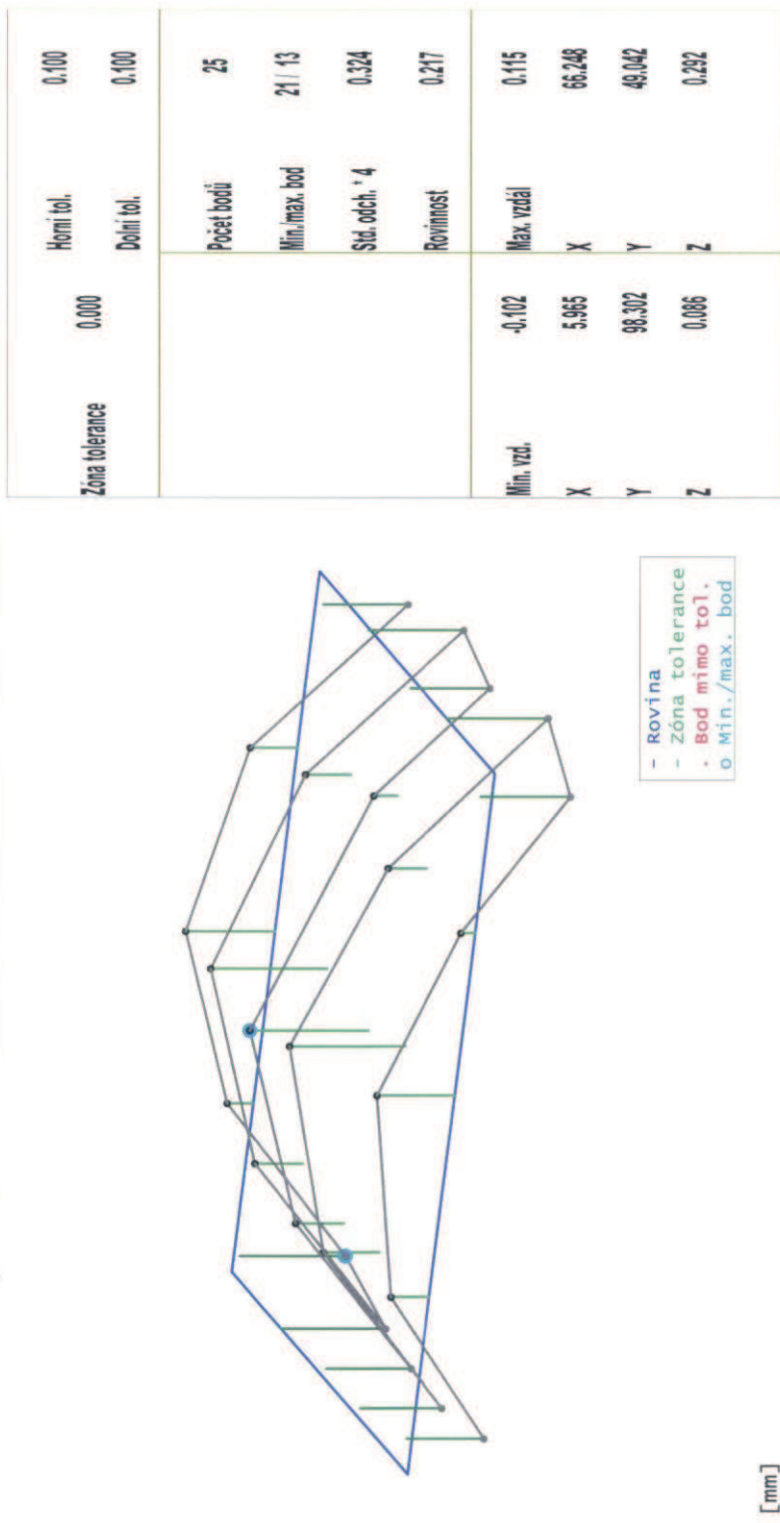
[mm]

GEOPAK, v3.2.R15

Strana 7

Výstup měření rovinnosti vzorku slitiny 6082 obráběného frézou průměru 20 mm.

P.V. rovinnost 2 1, [mm]		Rovinnost: Rovina (1) Gauss	
Jmeno uivatele		Datum a čas	3.5.2016 13:37
Číslo dílu	MONOLITNÍ FRÉZA Ø20	Protokol	
Seriové číslo		Výrobni příkaz	6082



PŘÍLOHA 5

Materiálové listy slitin 5083 a 6082 (vybrané strany).

LEXIKON TECHNICKÝCH MATERIÁLŮ

část 7, díl 6, kap. 3, EN AW-AlMg4, str. 1

díl 6, hliník a jeho slitiny

ČSN EN 573 STN EN 573 TRÍDICÍ ZNAK 42 1401	Slitina hliníku tvářená pro všeobecné účely	SLITINA EN AW-5086 [AlMg4]
---	--	---

Chemické složení [hm. %]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostatní	
								jednotl.	celkem
0,40	0,50	0,10	0,20-0,7	4,5-5,2	0,05-0,25	0,25	0,15	0,05	0,15
									zbytek

Polotovary									
[1] plechy, pásy, desky tvářené za tepla					ČSN EN 485-1(42 1416) ¹⁾				
					ČSN EN 485-2(42 4081) ²⁾				
					ČSN EN 485-3(42 7332) ³⁾				
[2] plechy, pásy, desky tvářené za studena					ČSN EN 485-1(42 1416) ¹⁾				
					ČSN EN 485-2(42 4081) ²⁾				
					ČSN EN 485-4(42 7336) ³⁾				
[3] tyče a trubky tažené za studena					ČSN EN 754-1 ¹⁾				
					ČSN EN 754-2(42 4085) ²⁾				
– tyče kruhové					ČSN EN 754-3 ^{3a)}				
– tyče čtvercové					ČSN EN 754-4 ^{3a)}				
– tyče ploché					ČSN EN 754-5 ^{3a)}				
– tyče šestihranné					ČSN EN 755-6 ^{3a)}				
– trubky bezešvé					prČSN EN 755-7 ^{3a)}				
– trubky lis. komorovou matricí					prČSN EN 754-8 ^{3a)}				
[4] lisované tyče, trubky a profily					ČSN EN 755-1(42 1419) ¹⁾				
					ČSN EN 755-2(42 4086) ²⁾				
					ČSN EN 755-3(42 7511) ³⁾				
– tyče kruhové					ČSN EN 755-4(42 7521) ³⁾				
– tyče čtvercové					ČSN EN 755-5(42 7525) ³⁾				
– tyče ploché					ČSN EN 755-6(42 7531) ³⁾				
– tyče šestihranné					prČSN EN 755-7 ^{3a)}				
– trubky bezešvé					prČSN EN 755-8 ^{3a)}				
– trubky lis. komor. matricí					prČSN EN 755-9 ^{3a)}				
– profily									
[5] vysokotekvenčně svařované trubky					ČSN EN 1592-1 ^{1a)}				
					ČSN EN 1592-2(42 4089) ²⁾				
					ČSN EN 1592-3 ^{3a)}				

Mechanické vlastnosti									
Polotovar	[1] [2]								
Rozměr t [mm]	2,5-150,0	0,2-0,5	0,5-3,0	3,0-6,0	6,0-12,5	12,5-150,0			
Stav	F	O/H111							
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa]	–	100							
Mez pevnosti R _m [MPa]	int. 240	240-310							
Tažnost A ₅₀ (A) [%]	–	11	12	15	17	(16)			
Tvrdost HB	–	65							
Poloměr ohybu 90° [mm]	–	0,5 t	1,0 t	1,5 t	2,5 t	–			
Poloměr ohybu 180° [mm]	–	1,0 t	1,0 t	1,5 t	–	–			

Údaje z norem ČSN jsou uveřejňovány se souhlasem ČSN.

Údaje z norem ČSN jsou uveřejňovány se souhlasem ČSN.

květen 2000

ČSN EN 573 STN EN 573 TRÍDICÍ ZNAK 42 1401			Slitina hliníku tvářena pro všeobecné účely			SLITINA EN AW-6082 [AlSi1MgMn]				
Chemické složení [hm. %]										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,7–1,3	0,50	0,10	0,4–1,0	0,6–1,2	0,25	0,20	0,10	0,05	0,15	zbytek
Polotovary										
[1] plechy, pásy, desky tvářené za tepla		ČSN EN 485-1(42 1416) ¹⁾								
		ČSN EN 485-2(42 4081) ²⁾								
		ČSN EN 485-3(42 7332) ³⁾								
[2] plechy, pásy, desky tvářené za studena		ČSN EN 485-1(42 1416) ¹⁾								
		ČSN EN 485-2(42 4081) ²⁾								
		ČSN EN 485-4(42 7336) ³⁾								
[3] tyče a trubky tažené za studena		ČSN EN 754-1 ¹⁾								
		ČSN EN 754-2(42 4085) ²⁾								
		ČSN EN 754-3(42 7611) ³⁾								
		ČSN EN 754-4(42 7621) ³⁾								
		ČSN EN 754-5(42 7625) ³⁾								
		ČSN EN 755-6(42 7631) ³⁾								
		prČSN EN 755-7 ^{3*)}								
[4] lisované tyče, trubky a profily		prČSN EN 754-8 ^{3*)}								
		ČSN EN 755-1(42 1419) ¹⁾								
		ČSN EN 755-2(42 4086) ²⁾								
		ČSN EN 755-3(42 7511) ³⁾								
		ČSN EN 755-4(42 7521) ³⁾								
		ČSN EN 755-5(42 7525) ³⁾								
		ČSN EN 755-6(42 7531) ³⁾								
[5] tažené dráty		prČSN EN 755-7 ^{3*)}								
		prČSN EN 755-8 ^{3*)}								
		prČSN EN 755-9 ^{3*)}								
		ČSN EN 1301-1(42 1418) ¹⁾								
[6] výkovky		ČSN EN 1301-2(42 4087) ²⁾								
		ČSN EN 1301-3(42 7412) ³⁾								
[7] tvářené přířezy pro kování		ČSN EN 586-1 ^{1*)}								
		ČSN EN 586-2(42 4082) ²⁾								
		ČSN EN 603-1(42 4082) ¹⁾								
		ČSN EN 603-2(42 1441) ²⁾								
		ČSN EN 603-3(42 4090) ^{3*)}								

Údaje z norem ČSN jsou uveřejňovány se souhlasem ČSN.

květen 2000

Polotovár	[1] [2]			
Rozměr t [mm]	0,4–1,5	1,5–3,0	3,0–6,0	6,0–12,5
Stav	T6, T651, T62			
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa]	260			255
Mez pevnosti R_m [MPa]	310			300
Tažnost A_{50} [%]	6	7	10	9
Tvrdost HBS	94			91
Poloměr ohybu 90° [mm]	2,5 t	3,5 t	4,5 t	6,0 t
Poloměr ohybu 180° [mm]	–	–	–	–
Polotovár	[1] [2]			
Rozměr t [mm]	12,5–60,0	60,0–100,0	100,0–150,0	150,0–175,0
Stav	T651, T62			
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa]	240			
Mez pevnosti R_m [MPa]	295			
Tažnost (A) [%]	(8)	(7)	(6)	(4)
Tvrdost HBS	89	89	84	83
Poloměr ohybu 90° [mm]	–			
Poloměr ohybu 180° [mm]	–			
Polotovár	[1] [2]			
Rozměr t [mm]	0,4–1,5	1,5–3,0	3,0–6,0	6,0–12,5
Stav	T61, T6151			
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa]	205			
Mez pevnosti R_m [MPa]	280			
Tažnost A_{50} [%]	10	11	11	12
Tvrdost HBS	82			
Poloměr ohybu 90° [mm]	2,5 t	2,5 t	4,0 t	5,0 t
Poloměr ohybu 180° [mm]	–	–	–	–
Polotovár	[1] [2]			
Rozměr t [mm]	12,5–60,0	60,0–100,0	100,0–150,0	150,0–175,0
Stav	T6151			
Mez kluzu R_p 0,2 [MPa]	200			
Mez pevnosti R_m [MPa]	275			
Tažnost (A) [%]	12	10	9	8
Tvrdost HBS	81			
Poloměr ohybu 90° [mm]	–			
Poloměr ohybu 180° [mm]	–			

Údaje z norem ČSN jsou uveřejňovány se souhlasem ČSNi.

květen 2000